

**Muskuläre Dysbalancen und motorische Kontrolle:
der Einfluss kurzfristig wirksamer Stressoren**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Fakultät für Humanwissenschaften
der Universität Regensburg



vorgelegt von
Simone Kubowitsch
aus Regensburg
2020

Regensburg 2020

Gutachterin (Betreuerin): Prof. Dr. Petra Jansen (Universität Regensburg)

Zweitgutachterin: Prof. Dr. Klaudia Winkler (OTH Regensburg)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
I. Theoretische Einführung	3
1. Muskuloskelettale Beschwerden im Bereich des Rückens	3
1.1 Epidemiologie und Risikofaktoren	3
1.2 Entstehung und Aufrechterhaltung	5
1.2.1 Entstehung: Schwerpunkt arbeitsplatzbezogene Modelle	5
1.2.2 Aufrechterhaltung und Chronifizierung von Rückenbeschwerden	9
1.2.3 Funktionelle Unterschiede bei Gesunden und Rückenschmerzpatienten.....	11
2. Motorische Kontrolle unter kurzfristig wirksamen Stressoren	16
2.1 Stress: Begriffsbestimmung und Relevanz.....	16
2.2 Muskelaktivierung unter kurzfristig wirksamen Stressoren	19
2.2.1 Allgemeine Aspekte der Muskelaktivierung unter Stress	19
2.2.2 Reaktionsspezifische Aspekte muskulärer Aktivierung	24
2.3 Haltungskontrolle und Bewegung unter kurzfristig wirksamen Stressoren	29
2.3.1 Allgemeine Aspekte von Haltungskontrolle und Bewegung unter Stress	29
2.3.2 Reaktionsspezifische Aspekte von Haltungskontrolle und Bewegung unter Stress.....	34
3. Zusammenfassung des aktuellen Forschungsstandes	43
II. Empirischer Teil	48
4. Methode: studienübergreifende Aspekte	48
4.1 Versuchspersonen.....	48
4.2 Kognitiver Stressor	48
4.3 Instrumente und Messungen.....	50
4.4 Datenanalyse und -auswertung	54
5. Studie 1.....	56
5.1 Methode.....	58
5.1.1 Stichprobe	58
5.1.2 Versuchsablauf und experimentelle Bedingungen	58
5.1.3 Instrumente und Messungen.....	60
5.1.4 Datenauswertung.....	61
5.2 Ergebnisse	63

Inhaltsverzeichnis

5.2.1	Manipulationsüberprüfung.....	63
5.2.2	Veränderung der Muskelaktivität unter Stress.....	66
5.2.3	Veränderung der posturalen Kontrolle unter Stress	70
5.2.4	Zusammenhang von Ängstlichkeit und Stressreaktivität.....	73
5.3	Diskussion.....	73
6.	Studie 2.....	84
6.1	Methode.....	86
6.1.1	Stichprobe	86
6.1.2	Versuchsablauf.....	87
6.1.3	Instrumente, Messungen und Datenanalyse	89
6.1.4	Statistische Auswertung.....	91
6.2	Ergebnisse	92
6.2.1	Fragebogen zur Erhebung der demographischen Variablen	92
6.2.2	Manipulationsüberprüfung: subjektive Einschätzung der Workload	92
6.2.3	Statische und dynamische muskuläre Dysbalancen	94
6.2.4	Bewegungsgeschwindigkeit und kognitive Leistung.....	96
6.2.5	Clusteranalyse: Statische Dysbalancen	97
6.3	Diskussion.....	98
7.	Studie 3.....	108
7.1	Methode.....	110
7.1.1	Stichprobe	110
7.1.2	Versuchsablauf und experimentelle Bedingungen	110
7.1.3	Instrumente, Messungen und Datenanalyse	111
7.1.4	Statistische Auswertung.....	113
7.2	Ergebnisse	114
7.2.1	Demographische Variablen, Ängstlichkeit, Depressivität und Selbstwirksamkeit	114
7.2.2	Manipulationsüberprüfung.....	115
7.2.3	Statische und dynamische muskuläre Dysbalancen	116
7.2.4	Korrelation und Regression: Psychologische Variablen und Stressreaktivität	118
7.3	Diskussion.....	120

8. Gesamtdiskussion	130
8.1 Muskuläre Dysbalancen unter kurzfristig wirksamen Stressoren.....	130
8.2 Haltungskontrolle und Bewegung unter kurzfristig wirksamen Stressoren	135
8.3 Einordnung der Ergebnisse	137
8.4 Praktische und klinische Ableitungen	138
8.5 Limitationen der Arbeit	139
8.6 Ausblick und weitere Forschungsfragen	141
9. Literaturverzeichnis.....	145

Zusammenfassung

Es liegen zahlreiche Erkenntnisse zur Erhöhung der allgemeinen Muskelaktivierung im Rücken unter Stress vor. Dieser neuromuskulären Stressantwort wird bei der Entstehung und Aufrechterhaltung von Rückenbeschwerden eine zentrale Bedeutung zugeschrieben. Aktuell noch unklar ist, ob und wie sich muskuläre Dysbalancen unter kurzfristig wirksamen Stressoren verändern. Muskuläre Dysbalancen als Muster asymmetrischer Muskelaktivierung von rechts- und linksseitigen Muskelpaaren im Rücken erscheinen als besonders dysfunktional. Effekte von Stress sind auch bei weiteren motorischen Prozessen wie der Haltungskontrolle beobachtbar und können, unabhängig von der Muskelaktivierung oder auch in Wechselwirkung mit dieser, die muskuloskelettale Beanspruchung erhöhen.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss kurzfristig wirksamer Stressoren auf muskuläre Dysbalancen im gesamten Bereich des Rückens und auf weitere Parameter der motorischen Kontrolle systematisch zu untersuchen. Die psychischen und körperlichen Anforderungen werden variiert sowie auf individueller Ebene insbesondere Variablen der Persönlichkeit und des Gesundheitszustandes hinsichtlich Rückenbeschwerden berücksichtigt.

Die erste Studie dieser Arbeit konzentrierte sich auf stressbedingte Veränderungen der muskulären Dysbalancen in der statischen Bedingung des Sitzens bei gesunden Teilnehmern für den gesamten Rücken. Dabei stand neben der grundlegenden Beantwortung der Frage, ob diese unter Stress zunehmen, der differentielle Einfluss kognitiver und emotionaler Stressoren im Mittelpunkt. Darüber hinaus wurden Veränderungen der posturalen Kontrolle berücksichtigt, um mögliche Interaktionen aus der muskulären Aktivierung und einer Veränderung der Bewegung unter Stress zu erfassen. Als individueller Faktor wurde Ängstlichkeit auf ihren Zusammenhang mit der muskulären Reaktivität und der posturalen Kontrolle untersucht. Beide Stressoren erhöhten die Dysbalancen im unteren Bereich des Rückens, mit teilweise stärkeren Ausprägungen während des emotionalen Stressors. Dieses Muster zeigte sich intraindividuell deutlich konsistent. Der kognitive Stressor bedingte zusätzlich Zunahmen im oberen Bereich des Rückens, wobei diese mit Veränderungen der posturalen Kontrolle unter Stress einhergingen und somit teilweise auch durch die Bewegung bedingt sein könnten. Die Ausprägung der Ängstlichkeit hatte keinen Einfluss auf die muskuläre Stressreaktivität, jedoch wiesen ängstlichere Personen geringere Haltungsschwankungen auf.

In der zweiten Studie wurde die physikalische Belastung in Form einer kontrollierten Extension und Flexion des Oberkörpers variiert sowie mit einer kognitiv-motorischen Dual-Task-Aufgabe der Einfluss eines kognitiven Stressors untersucht. Neben den Auswirkungen auf

die statischen muskulären Dysbalancen wurde zusätzlich der neu entwickelte Parameter der dynamischen Dysbalancen berücksichtigt, um rechts- und linksseitige Belastungswechsel über den zeitlichen Verlauf hinweg abzubilden. Als Hauptergebnis zeigte sich, dass die Dual-Task-Aufgabe sowohl die absoluten statischen als auch die dynamischen Dysbalancen erhöhte, unabhängig vom Geschlecht. Auch hier waren die Veränderungen der asymmetrischen Muskelaktivierung unter Stress unabhängig von dem in dieser Studie zusätzlich berücksichtigten Parameter der motorischen Kontrolle, der Bewegungsgeschwindigkeit. Eine vertiefende Analyse der Stressantworten konnte zwei sich unterscheidende Muster der asymmetrischen Muskelaktivierung identifizieren. Während bei ca. zwei Drittel der Teilnehmer keine Veränderung auf der Ebene statischer Dysbalancen und eine Zunahme dynamischer Dysbalancen beobachtet werden konnte, zeigte sich bei den übrigen Teilnehmern ein gegenteiliges Muster mit vermehrten statischen Dysbalancen und keinen Veränderungen bzw. Abnahmen im Hinblick auf die dynamischen Dysbalancen.

Die dritte Studie verglich die statischen und dynamischen muskulären Dysbalancen von Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern während einer Baseline-Messung und eines kognitiven Stressors im Sitzen. Zusätzlich wurden die individuellen Variablen der Ängstlichkeit, Depressivität und allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung hinsichtlich ihres Einflusses auf die Stressreaktivität untersucht. Rückenschmerzpatienten zeigten unabhängig von der Bedingung höhere statische muskuläre Dysbalancen im unteren Rücken. Auf der Ebene dynamischer Dysbalancen waren in der Baseline-Bedingung keine Unterschiede feststellbar, jedoch führte bei den Rückenschmerzpatienten die Stressbedingung zu mehr dynamischen Dysbalancen im oberen Rücken. Während die muskuläre Stressantwort bei Gesunden nicht mit den Ausprägungen der individuellen Variablen zusammenhing, beeinflusste insbesondere die allgemeine Selbstwirksamkeitserwartung, aber auch die Depressivität die Stressreaktivität der muskulären Dysbalancen.

Zusammenfassend waren über alle drei Studien Zunahmen der asymmetrischen Muskelaktivierung und auch Veränderungen der Haltungskontrolle und Bewegungsgeschwindigkeit unter Stress in Verbindung mit unterschiedlichen Mustern der motorischen Kontrolle feststellbar. Die beobachteten Veränderungen erhöhen vermutlich die muskuläre und auch biomechanische Beanspruchung mit möglichen negativen kurz- und langfristigen Auswirkungen auf das muskuloskelettale System. Der Einfluss der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung und Depressivität auf die Ausprägungen der muskulären Dysbalancen bei Rückenschmerzpatienten unterstreicht den Stellenwert psychologischer Faktoren.

I. Theoretische Einführung

1. Muskuloskelettale Beschwerden im Bereich des Rückens

1.1 Epidemiologie und Risikofaktoren

Erkrankungen des Muskel-Skelett-Systems und des Bindegewebes sind weltweit die zweithäufigste Ursache für Lebensjahre, die mit Beeinträchtigungen einhergehen (James et al., 2018). Innerhalb dieser Kategorie stellen Rückenschmerzen im Lendenbereich vom unteren Rippenbogen bis zu den Glutealfalten, mit einer längeren Schmerzdauer als einem Tag, die häufigste Subgruppe der muskuloskelettalen Beschwerden dar (Storheim & Zwart, 2014). Über den Zeitraum von 1990 bis 2017 zeigt sich die Krankheitslast durch Rückenschmerzen im Lendenwirbelbereich unverändert hoch (James et al., 2018). Epidemiologische Studien und Überblicksarbeiten weisen teilweise deutlich divergierende Daten zu Inzidenz und Prävalenz für Rückenschmerzen aus, was zu einem nennenswerten Teil auf die unzureichend genaue Definition des Begriffes Rückenschmerz im Sinne von Dauer, Intensität, Schmerzlokalisierung und Berücksichtigung der Ursachen zurückzuführen sein dürfte. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass in der Allgemeinbevölkerung westlicher Industrienationen eine Punktprävalenz von etwa 20 bis 30 %, eine Ein-Jahres-Prävalenz von 15 bis 60 % und eine Lebenszeitprävalenz von ca. 80 % für Rückenschmerzen gegeben ist, wobei in der Mehrzahl der Studien nur Daten für Rückenschmerzen im Lendenwirbelbereich berücksichtigt werden. Neben den häufig auftretenden Schmerzen im Lumbalbereich sind die Prävalenzen für Schmerzen im zervikalen Bereich etwas niedriger, am seltensten liegen Schmerzen im thorakalen Bereich vor (Hoy et al., 2010; Punnett & Wegman, 2004; Rubin, 2007; Woolf & Pfleger, 2003; Yang et al., 2016). Neben einer Unterscheidung nach Schmerzlokalisierung werden Rückenschmerzen nach Zeitdauer in akut, subakut und chronisch eingeteilt, ohne dass die dabei zugrunde gelegten Zeiträume einheitlich verwendet werden würden. Beispielhaft sei hier auf das im deutschsprachigen Raum verbreitete Begriffsverständnis hingewiesen, wonach unter akuten Rückenschmerzen nur Schmerzepisoden mit einer Dauer von weniger als sechs Wochen verstanden werden. Episoden, die länger als sechs Wochen bestehen, werden dagegen als subakut und solche mit einer Dauer von mehr als zwölf Wochen als chronisch eingestuft (Bundesärztekammer (BÄK), Kassenärztliche Bundesvereinigung (KBV), Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF), 2017).

Die Tatsache, dass Rückenschmerzen nur bei etwa 10 % der Patienten auf spezifische

anatomische Ursachen zurückzuführen sind (Koes et al., 2006), verweist auf weitere Risikofaktoren jenseits rein organischer Erklärungen. Sowohl für den unteren Rückenbereich als auch den Bereich des Nackens konnten neben physischen Faktoren am Arbeitsplatz auch psychosoziale und individuelle Faktoren für das Entstehen von Beschwerden identifiziert werden (Bongers et al., 1993; Dick et al., 2015; Marras, 2012). Unter physischen oder biomechanischen Faktoren ist beispielsweise das Heben von schweren Lasten zu verstehen. Als psychosoziale Faktoren werden in der Literatur Anforderungen bezeichnet, die aus kognitiven, emotionalen oder interpersonalen Anforderungen resultieren, wie geringe Entscheidungsspielräume oder fehlende soziale Unterstützung. Den individuellen Faktoren werden insbesondere Alter, Geschlecht, Gewicht, körperliche Aktivität, Fähigkeiten, Fertigkeiten, Persönlichkeitsvariablen und genetische Aspekte zugerechnet (Bongers et al., 2006; Ferguson & Marras, 1997; Wahlström, 2005). Bezogen auf körperliche Risikofaktoren am Arbeitsplatz liegen zahlreiche Querschnitt- und auch Längsschnittstudien vor, die den Zusammenhang zwischen biomechanischen Belastungen, wie Beugebewegungen, ungünstigen Haltungen, Heben schwerer Lasten und Vibrationen einerseits sowie dem Entstehen von Beschwerden im oberen und unteren Rückenbereich andererseits untersucht haben (Bergmann et al., 2017; Bongers et al., 2002; Coenen et al., 2014; Marras et al., 1995; Mayer et al., 2012; Yang et al., 2016). Während einige Autoren hierfür einen eindeutigen Zusammenhang und auch eine Dosis-Wirkungs-Beziehung identifizieren konnten (Coenen et al., 2013), gelang dies anderen nicht (Swain et al., 2020). Daneben liegen zahlreiche Studien zum Zusammenhang von psychosozialen Faktoren wie Arbeitszufriedenheit, Monotonie, soziale Unterstützung und Arbeitsbeziehungen, Kontrollerleben, Arbeitsbelastungen, Entscheidungsspielraum, Arbeitstempo und selbst berichtetem Stresserleben vor (Hoogendoorn et al., 2000; Linton, 2001; Swedish Council on Health Technology Assessment (SBU), 2014). In einer Metaanalyse konnten Hauke und Kollegen (2011) für das Vorliegen von psychosozialen Faktoren einen kleinen bis mittleren Effekt als Risikofaktor für das Entstehen von muskuloskelettalen Beschwerden in mehreren Körperregionen identifizieren. Am deutlichsten fällt dieser Effekt für den unteren Rücken aus. Zusätzlich konnten Macfarlane et al. (2009) einen differentiellen Einfluss verschiedener psychosozialer Risikofaktoren auf Beschwerden in den Bereichen der oberen Extremitäten, des Nackens und der Schultern sowie im Bereich des unteren Rückens belegen. Für den unteren Rücken ergab sich der deutlichste Zusammenhang mit hohen Arbeitsanforderungen, niedriger Arbeitszufriedenheit und niedriger sozialer Unterstützung, für die Bereiche der oberen Extremitäten, des Nacken und der Schultern hingegen für zu hohe, aber auch monotone Arbeitsanforderungen. Individuelle Faktoren wurden sowohl im arbeitsplatzbezogenen Kontext als auch in

der Gesamtpopulation untersucht. Bezogen auf die Entstehung können eine vorausgegangene Rückenschmerzepisode, genetische Einflüsse, Geschlecht und Lebensstilfaktoren, wie geringe körperliche Aktivität, als Risikofaktoren eingestuft werden (Hartvigsen et al., 2018; van Tulder et al., 2002). Faktoren wie Alter und Übergewicht werden angesichts der Datenlage kontrovers diskutiert (Green et al., 2018; Ibrahimi-Kaçuri et al., 2015). Psychologische Variablen wie Depressivität, Ängstlichkeit, Selbstwirksamkeit, erlebter Distress und schmerzbezogene Kognitionen bzw. Verhaltensweisen scheinen sowohl für das Entstehen als auch insbesondere bei der Chronifizierung von Rückenschmerzen eine Rolle zu spielen (Kopeck et al., 2004; H. Lee et al., 2015; Linton, 2000; Pincus et al., 2002).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alle Risikofaktoren im Sinne eines biopsychosozialen Modells zusammenwirken. Auch wenn das exakte Zusammenspiel der beteiligten Faktoren noch als unklar zu bezeichnen ist, lassen sich durch multivariate prädiktive Modelle nach aktuellem Forschungsstand etwa 43 % der Varianz aufklären (Kent & Keating, 2008). Insgesamt ist davon auszugehen, dass keine bivariaten Zusammenhänge vorliegen. Von Videman (1989) wurde postuliert, dass insbesondere an Arbeitsplätzen mit niedrigen körperlichen Anforderungen den individuellen und psychosozialen Faktoren eine hohe Bedeutung zukommt. Befunde von Hollmann und Kollegen (2001) zur Interaktion zwischen körperlicher und psychischer Arbeitsbelastung sowie Kontrollerleben bestätigten diese Annahme. Das Erleben von Kontrollmöglichkeiten am Arbeitsplatz schwächte den Zusammenhang zwischen psychischer Arbeitsbelastung und muskuloskelettalen Symptomen ab, wenn die körperliche Arbeitsbelastung niedrig war. Dies hatte jedoch nur einen kleinen Effekt, wenn die körperlichen Anforderungen hoch waren. So lässt sich schlussfolgern, dass insbesondere an Arbeitsplätzen mit geringen körperlichen Anforderungen die erlebte Beanspruchung aus psychosozialen Belastungen bei der Entstehung von muskuloskelettalen Beschwerden eine bedeutsame Rolle spielt. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, Konzepte und empirische Befunde sowohl im Arbeitsleben als auch in einem klinischen Zusammenhang genauer zu beleuchten, einschließlich der Unterschiede zwischen Rückenschmerzpatienten und Gesunden.

1.2 Entstehung und Aufrechterhaltung

1.2.1 Entstehung: Schwerpunkt arbeitsplatzbezogene Modelle

Die Bedeutung einer biopsychosozialen Perspektive für das Verständnis muskuloskelettaler Beschwerden wurde bereits hervorgehoben. Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse zur multifaktoriellen Genese von Rückenbeschwerden (Green et al., 2018; Hartvigsen et al.,

2018; Pincus et al., 2013; Waddell, 1987) geben die meisten Ansätze und Modelle der Berücksichtigung eines kombinierten Einflusses von physischen, psychosozialen und individuellen Faktoren den Vorzug gegenüber der Analyse einzeln betrachteter Risikofaktoren (Huang et al., 2002; National Research Council (US) and Institute of Medicine (US) Panel on Musculoskeletal Disorders and the Workplace, 2001). Mehr oder weniger explizit liegt nahezu allen Modellen ein Belastungs-Beanspruchungs-Modell zugrunde, wobei Belastungen objektive Faktoren darstellen, die von außen auf den Menschen einwirken und die daraus resultierenden Auswirkungen als Beanspruchungen verstanden werden. Die Intensität der Beanspruchung wird dabei durch individuelle Faktoren moderiert (Schaper, 2019).

Eine Reihe von Modellen hebt besonders auf Arbeitsplatzfaktoren ab, was angesichts des hohen Anteils von Rückenschmerzen auch im jungen und damit häufig mit Berufstätigkeit verbundenem Alter (Ellert et al., 2006) plausibel erscheint. Mehrere Modelle aus der arbeitsplatzbezogenen Forschung zielen im Sinn allgemeingültiger Erklärungsansätze für die Entstehung von gesundheitlichen Beschwerden auf generelle Zusammenhänge zwischen psychosozialen Belastungsfaktoren und auftretenden Beanspruchungsreaktionen ab, allerdings ohne den Anspruch, den exakten Pfad für spezifische Beschwerden zu skizzieren und körperliche Risikofaktoren mit einzubeziehen. Zu diesen generischen Modellen zählen das Effort-Reward-Dysbalance (ERI) Modell von Siegrist (1996), dem die Annahme zugrunde liegt, ein erlebtes Ungleichgewicht von hoher beruflicher Verausgabung und geringer Belohnung führe zu emotionalem Distress und die daraus resultierenden physiologischen Prozesse wiederum zu körperlichen Stressreaktionen. Die empirische Befundlage hierzu ist insofern uneinheitlich, als ein Review unter Einbeziehung des ERI Modells zwar keinen systematischen Zusammenhang zwischen psychosozialen Stressoren und muskuloskelettalen Schmerzen ergab (P. Koch et al., 2014), jedoch eine Längsschnittstudie von Halonen et al. (2019) die Annahme stützt, dass mit dem Beginn einer ERI auch Schmerzen im Schulter- und Nackenbereich sowie im unteren Rücken einhergehen können. Das ebenfalls generische Anforderungs-Kontroll-Modell von Karasek (1979) stellt die Verbindung von hohen beruflichen Anforderungen und geringen Kontrollmöglichkeiten bei der Arbeitstätigkeit in den Mittelpunkt, um über die in der Folge erhöhte Beanspruchung gesundheitliche Risiken zu erklären. Auch hierzu liegen unterschiedliche Studienergebnisse vor. Kamen Bongers, Kremer und ter Laark (2002) nach einer Sichtung von Befunden zu der Einschätzung, für Beschwerden in den Schultern und oberen Extremitäten wäre überwiegend kein signifikanter Zusammenhang im Sinn des Anforderungs-Kontroll-Modells belegbar, so ergaben neuere Längsschnittstudien sehr wohl empirische Evidenz für die An-

nahme entsprechender Effekte (Kraatz et al., 2013; Lang et al., 2012). Diesen Erklärungsansätzen kommt durch die Betrachtung relevanter Prozesse auf Belastungs- und Beanspruchungsseite gleichwohl ein hoher heuristischer Wert zu. Sie können als Grundlage dafür dienen, die in anderen Modellen enthaltenen, spezifischeren Erklärungsansätze einzuordnen, beispielsweise auf physiologischer Ebene, allerdings bleiben sie eine Differenzierung dieser Prozesse schuldig.

Ein differenzierteres Verständnis liegt Modellen zugrunde, die zusätzlich biomechanische Risikofaktoren einbeziehen und im Sinne eines transaktionalen Stressverständnisses auch den moderierenden Einfluss individueller Faktoren berücksichtigen. Zwei aus umfangreichen Überblicksarbeiten abgeleitete Modelle sind das Modell des US National Research Council (2001) und das Modell von MacDonald und Evans (2006). Ersteres postuliert, dass am Arbeitsplatz drei Arten von Risikofaktoren einwirken und unterscheidet als miteinander interagierende Faktoren externale bzw. biomechanische Anforderungen, organisationale Faktoren sowie den sozialen Kontext. Diese beeinflussen sowohl die biomechanische Beanspruchung als auch die aus dem Übersteigen von Belastungstoleranzen resultierenden Beschwerden und Schmerzen. Individuelle Faktoren beeinflussen die in der Person ablaufenden Prozesse. Damit ist dieses Modell deutlich spezifischer als die oben genannten generischen Ansätze. Aufgrund der Kernannahme des Entstehens von Beschwerden durch die Überschreitung von biomechanischen Toleranzgrenzen skizziert es jedoch keine konkreten Pfade zum Einfluss von Beanspruchungsfolgen durch Stress. Betrachten wir das Modell von MacDonald und Evans (2006), so lässt sich als Kernaussage festhalten, dass Risikozustände aus einer fehlenden Entsprechung zwischen Anforderungen am Arbeitsplatz, die sowohl körperlicher als auch psychosozialer Natur sein können, einerseits und zur Verfügung stehenden Bewältigungsressourcen andererseits resultieren. Dies führt zu risikobehafteten individuellen Zuständen mit der Hauptfolge von hohen Ermüdungszuständen, die sowohl muskulär in spezifischen Körperregionen als auch auf allgemein körperlicher Ebene zu verstehen sind, woraus ein Risiko für muskuloskelettale Beschwerden resultiert. Damit greift dieses Modell explizit auf allgemeine Konzeptionen wie das von Karasek (1979) zurück sowie auf ein transaktionales Verständnis von Belastung und Beanspruchung, in Form der Berücksichtigung von Ressourcen. Vorteile dieser Modelle bestehen in der theoretischen Fundierung und dem Aufzeigen möglicher Interaktionen.

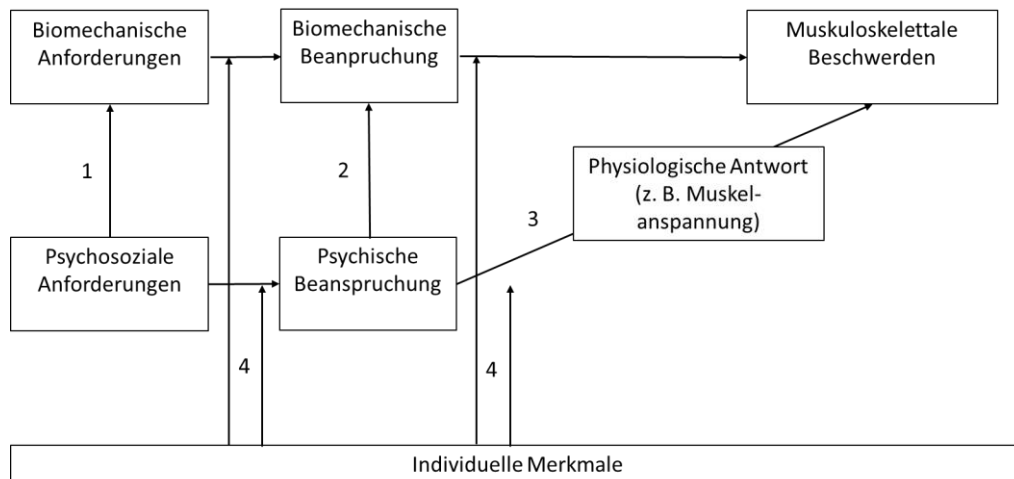
Für die vorliegende Arbeit sind Modelle von besonderem Interesse, die Ableitungen für den Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Stressoren und der Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden erlauben sowie für letztere spezifische Pfade skizzieren. Basierend auf epidemiologischen Daten entwickelte die Forschergruppe um Bongers (Bongers et

al., 1993; Bongers et al., 2002) unter Einbeziehung allgemeiner Konzepte der Stressforschung sowie Erkenntnissen zu psychologischen Faktoren bei chronischen Schmerzpatienten ein Modell zur Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden. Dieses weist deutliche Überschneidungen zu einem von Sauter und Swanson (1996) postuliertem Modell auf. Im Folgenden soll eine Modellvorstellung, welche die wichtigsten Annahmen und Wirkpfade beider Modelle berücksichtigt, skizziert werden (siehe Abbildung 1). Mechanische Belastungen können sowohl auf direktem Weg muskuloskelettale Symptome verursachen als auch im Zusammenwirken mit psychosozialen Anforderungen und dadurch bedingten Beanspruchungen. Letztere kann zu einer physiologischen Stressantwort mit erhöhter Muskelanspannung führen, woraus Symptome in Form akuter muskuloskelettaler Beschwerden resultieren. In diesem Kontext wirken individuelle Faktoren jeweils moderierend, so etwa früher aufgetretene Symptome, funktionelle Kapazität (z. B. Muskelkraft), Coping-Strategien und Merkmale der Persönlichkeit. Die diskutierten Pfade heben auf folgende mögliche Zusammenhänge ab:

- 1) Psychosoziale Anforderungen der Arbeitstätigkeit bewirken beispielweise über Zeitdruck eine Veränderung der biomechanischen Anforderungen (Birch et al., 2000)
- 2) Erlebte Beanspruchung kann über Veränderungen von Körperhaltung, Bewegungsabläufen und aufgewendeten Kräften die biomechanische Beanspruchung unmittelbar erhöhen (Wahlström et al., 2002).
- 3) Neben verhaltensbezogenen Veränderungen kann erlebte Beanspruchung auch physiologische Stressantworten wie eine erhöhte Muskelanspannung bedingen und dadurch muskuloskelettale Symptome begünstigen; weitere physiologische Mechanismen in diesem Kontext verändern die Schmerzwahrnehmung und -verarbeitung und vermögen hierüber muskuloskelettale Symptome zu verstärken (Ahmad & Zakaria, 2015; Lundberg, Forsman et al., 2002).
- 4) Individuelle Merkmale moderieren den Zusammenhang zwischen Anforderungen und erlebter Beanspruchung, sowohl in biomechanischer als auch psychischer Hinsicht. Im weiteren Verlauf können individuelle Merkmale auch die Auswirkung dieser Beanspruchungen im Sinn muskuloskelettaler Beschwerden beeinflussen (Davis & Marras, 2003; Wahlström et al., 2000).

Abbildung 1

Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden nach Bongers et al. (1993, 2002) sowie Sauter und Swanson (1996)



Anmerkung. Diese Abbildung zeigt Pfade auf, die bei der Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden über Anforderungs-Beanspruchungs-Zusammenhänge interagieren. Dabei werden sowohl biomechanische als auch psychosoziale/psychische Faktoren sowie Merkmale auf individueller Ebene berücksichtigt.

Die Studien zur empirischen Evidenz der vorgestellten Pfade sind als exemplarisch zu betrachten, weitere Erkenntnisse hierzu werden in den folgenden Kapiteln ausgeführt. Kritisch anzumerken ist bei den Modellvorstellungen von Bongers et al. (1993; 2002) sowie Sauter und Swanson (1996), dass Faktoren außerhalb des Arbeitsplatzes nicht berücksichtigt werden, obwohl ein analoges Zusammenwirken von biomechanischen und psychologischen Stressoren in anderen Lebensbereichen als plausibel angesehen werden kann. Aus Belastungen in unterschiedlichen Lebensbereichen können zudem verzögerte Erholungsprozesse sowie akkumulierte Beanspruchungen im zeitlichen Verlauf resultieren (Melin & Lundberg, 1997; Mierswa & Kellmann, 2015). Eine solche Berücksichtigung mittelfristiger Einflussfaktoren aus unterschiedlichen Bereichen leitet über zur Frage der Chronifizierung von Beschwerden sowie der Einbeziehung von Faktoren auf individueller Ebene.

1.2.2 Aufrechterhaltung und Chronifizierung von Rückenbeschwerden

Modellvorstellungen zur Aufrechterhaltung und Chronifizierung von Rückenbeschwerden wurden überwiegend in einem klinisch-psychologischen Kontext entwickelt und fokussieren oftmals auf den Übergang von akuten zu chronischen Beschwerden sowie deren

Fortdauer (Flor et al., 1990; Hasenbring et al., 2012; Pfingsten & Hildebrandt, 2004). Auch hier hat sich ein biopsychosoziales Verständnis zum Zusammenwirken einzelner Faktoren etabliert, etwa zur Schmerzsensibilisierung auf biologischer Ebene, zum Zeitpunkt der Rückkehr an den Arbeitsplatz auf sozialer Ebene sowie zu depressiver Verstimmung auf psychologischer Ebene (Pincus et al., 2013). Bei chronischen wie auch bei akuten Beschwerden besteht auf biologischer Ebene keine proportionale Beziehung zwischen einem objektivierbaren medizinischen Befund und dem Schmerzempfinden (Hasenbring et al., 2017). Im Gegensatz zu arbeitsplatznahen Modellen, die neben körperlichen Belastungen den Einfluss von psychosozialen Faktoren in den Mittelpunkt stellen, wird im klinischen Setting die Rolle individueller psychologischer Faktoren deutlich stärker hervorgehoben. Emotionale, kognitive und Verhaltensaspekte, die die Schmerzverarbeitung und -bewältigung betreffen, tragen zur Chronifizierung, und teilweise auch zur Entstehung von Rückenschmerzen bei (Hasenbring et al., 2001; Hasenbring et al., 2018). So konnte ein von Linton (2000) erstelltes Review, in welchem nur prospektive Studien berücksichtigt wurden, Evidenz zum Einfluss von Depressivität, negativ erlebtem Stress, maladaptiven schmerzbezogenen Kognitionen und Coping-Verhalten aufzeigen. Auch Befunde von Del Campo et al. (2017) und Jarvik et al. (2005) weisen auf der Ebene der emotionalen Stimmungslage Depressivität als signifikanten Risikofaktor für die Entstehung von Rückenbeschwerden aus sowie von Cherkin et al. (1996) und Pincus et al. (2002) zusätzlich auch für den Übergang vom akuten zum chronischen Schmerz. Dies zeigte sich ebenso für negativ erlebten Stress und Ängstlichkeit (Del Campo et al., 2017; Linton, 2000). Neben diesen negativ erlebten emotionalen Zuständen tragen schmerzbezogene Kognitionen wie das Katastrophisieren, *Fear-avoidance-beliefs* oder Durchhalteappelle sowie damit verbundene Verhaltensweisen zur individuellen Schmerzbewältigung, wie Vermeidungs- oder unangemessenes Durchhalteverhalten, zur Chronifizierung von Rückenschmerzen bei (Hasenbring et al., 2014). Positive kognitive Überzeugungen wie Selbstwirksamkeitserwartungen können dagegen positive Auswirkungen auf den Umgang mit vorliegenden Beschwerden sowie auf den Schweregrad der erlebten Beeinträchtigung und Schmerzen haben (Costa et al., 2011; Geisser et al., 2003; Jackson et al., 2014; Turk, 1999). Es werden diverse Wirkmechanismen zum Einfluss von und Wechselwirkungen zwischen diesen emotionalen und kognitiven Faktoren auf Rückenschmerzen diskutiert. Negativ erlebte Emotionen können mit einer erhöhten Muskelaktivität einhergehen und in der Folge zu musklären Schmerzen oder auch Belastungen der spinalen Strukturen führen (Flor et al., 1985). Darüber hinaus können sich diese verhaltensbezogen auswirken und beispielsweise zu Rückzugs- und Vermeidungsverhalten führen, was zum einen im Sinne eines sich selbst aufrechterhaltenden Mechanismus zur Persistenz der Depressivität führen und zum

anderen die Muskulatur abschwächen kann (Hasenbring et al., 2017). Bei der Bewältigung des Schmerzerlebens ist von einer Wechselwirkung von emotionalem Erleben und kognitiven Überzeugungen auszugehen. So waren Rückenschmerzpatienten, die der Überzeugung sind, mit dem Schmerz umgehen zu können, weniger gefährdet, Merkmale von Depressivität und auch Vermeidungsverhalten zu zeigen (Turk & Okifuji, 2002).

Entsprechend der Modelle der Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden am Arbeitsplatz (Bongers et al., 2002; Sauter & Swanson, 1996), liegt mit dem *Psychobiologischen Modell chronischer Schmerzsyndrome der Skelettmuskulatur* (Flor & Turk, 1984; Turk & Flor, 1984) eine Konzeption vor, in der die physiologische Stressantwort der paravertebralen Muskulatur bei der Chronifizierung von Rückenschmerzen als wesentlicher Faktor berücksichtigt wird. Eine der Voraussetzungen für eine Hyperaktivität der Muskulatur ist in diesem Modell die Annahme einer Reaktionsstereotypie der Rückenmuskulatur, die aufgrund genetischer Prädisposition, Verletzungen oder früher Lernerfahrungen vorliegen kann. Diese Stereotypie wird als Reaktion auf intensive aversive Reize gezeigt, wie beispielsweise innerfamiliäre Konflikte oder Belastungen am Arbeitsplatz, in Verbindung mit maladaptiven Bewältigungsstrategien des Individuums. Die Reaktionsstereotypie wiederum bedingt nach Turk und Flor (1984) über Spasmen und Ischämien in der Muskulatur eine Schmerzreaktion. Lernprozesse führen, beispielsweise über Vermeidungsverhalten, zu einer Aufrechterhaltung der Schmerzreaktion. Die Annahmen des Modells konnten in Studien teilweise gestützt werden (DeGood et al., 1994; Flor et al., 1985; Glombiewski et al., 2008), teilweise jedoch auch nicht (Cohen et al., 1986; Collins et al., 1982) und so wird die Gültigkeit dieses Modells kontrovers diskutiert (Glombiewski et al., 2008). In diesem Kontext lässt sich die Frage stellen, ob und ggf. auf welche Weise sich zwischen gesunden Personen und Rückenschmerzpatienten Unterschiede hinsichtlich Muskelaktivierung und weiterer motorische Prozesse feststellen lassen.

1.2.3 Funktionelle Unterschiede bei Gesunden und Rückenschmerzpatienten

Auch wenn akute und auch chronische Rückenschmerzen in 90 % der Fälle keinen spezifischen medizinischen Befund aufweisen, zeigen sich auf funktioneller Ebene veränderte motorische Kontrollstrategien, die für die Entstehung und Aufrechterhaltung von muskuloskelettalen Beschwerden als mitverantwortlich betrachtet werden (Hodges et al., 2019; Scholle et al., 2016). Unter motorischer Kontrolle werden alle sensorischen und motorischen Prozesse verstanden, die zur Kontrolle von Haltung und Bewegung notwendig sind, um eine gegebene motorische Aufgabe ausüben zu können (van Dieën et al., 2019). Dabei werden das zentrale und periphere Nervensystem sowie die Muskulatur als Effektoren des motorischen Systems

berücksichtigt.

Bei der Gewährleistung der Stabilität der Wirbelsäule kommt der spinalen Muskulatur, über eine situationsadäquate Anpassung bei veränderten Anforderungen, eine bedeutsame Rolle zu (Panjabi, 2006). Durch das Sicherstellen der segmentalen Stabilität und der Kontrolle der Bewegung zwischen den Gelenkflächen stellt sie einen aktiven Schutz der schmerzempfindlichen Strukturen dar (Hildebrandt, 2003; van Dieën, Cholewicki, & Radebold, 2003). So beobachteten P. J. Lee et al. (2006), dass sich die RumpfstEIFigkeit und damit die Stabilität in Abhängigkeit von der Koaktivierung agonistischer und antagonistischer Muskeln verändert. Diese Muster der Muskelaktivierung besitzen somit funktionellen Charakter und sind als adaptiv einzuordnen (Reeves et al., 2019). Jedoch kann eine zu hohe und damit nicht mehr adaptive Koaktivierung zu einer schnelleren Ermüdung der Muskulatur (van Dieën et al., 2009), zu Belastungen der spinalen Strukturen (Marras et al., 2003) sowie in der Folge zu Rückenbeschwerden führen (Grabner et al., 1992; Price et al., 1948). Über die Fragestellung, ob und wie sich die Muskelaktivierung von Rückenschmerzpatienten und Gesunden unterscheidet, wird versucht, die Rolle einer möglicherweise beeinträchtigten muskulären Funktionalität aufzuklären. Bezogen auf das Niveau der Muskelaktivierung während verschiedener statischer und dynamischer Aufgaben liegen allerdings deutlich inkonsistente Ergebnisse vor (Geisser et al., 2005; Oddsson & Luca, 2003; van Dieën, Cholewicki, & Radebold, 2003; van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003). Während sich einerseits in Studien bei Rückenschmerzpatienten eine höhere Muskelaktivität zeigte, wurden andererseits Muster vergleichbarer Muskelaktivität (Arena et al., 1989; Marras et al., 2004; Nouwen et al., 1987; Roland, 1986) oder auch niedrigerer Muskelaktivität (Ahern et al., 1988; Dolce & Raczynski, 1985; van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003) identifiziert. Diese Erkenntnisse können in Modelle eingeordnet werden, die eine erhöhte oder auch erniedrigte Muskelaktivierung grundlegend als adaptive Reaktion auf eine Verletzung oder das Erleben von Schmerz ansehen, die jedoch bei mittel- und langfristigem Weiterbestehen mit negativen Konsequenzen verbunden ist (van Dieën et al., 2019). Das *Pain-spasm-pain*-Modell (Travell et al., 1942) postuliert, dass Verletzungen zu Schmerz führen, der reflexartig eine starke Kontraktion in der die Verletzung umgebenden Muskulatur auslöst. Über eine daraus resultierende lokale Minderdurchblutung können Schmerzrezeptoren gereizt und somit eine weitere Erhöhung der Muskelanspannung hervorgerufen werden. Damit lassen sich Ergebnisse einordnen, die eine höhere Muskelaktivierung bei Rückenschmerzpatienten belegten. Das *Pain-adaptation*-Modell (Lund et al., 1991) dagegen versucht, Muster verringerter Muskelaktivität zu erklären. Schmerz führt demzufolge zu einer Verringerung der Aktivität in

der agonistischen und zu einer Erhöhung in der antagonistischen Muskulatur. Daraus resultieren eine reduzierte Bewegungsgeschwindigkeit und ein geringerer Bewegungsumfang, mit dem Ziel der Vermeidung einer mechanischen Provokation von Schmerz in dem verletzten Gewebe sowie der Vermeidung einer weiteren Verletzung. Van Dieën et al. (2003) konnten in einem Überblicksartikel zum Vergleich der beiden Modelle weder eindeutige Belege für das *Pain-spasm-pain*-Modell noch für das *Pain-adaptation*-Modell finden. Eine weitere Problematik dieser Modelle ist, dass diese darauf beschränkt sind, eine Veränderung der Muskelaktivierung als Folge einer Verletzung oder eines schmerzhaften Erlebens zu interpretieren und damit primär das Aufrechterhalten und die Chronifizierung von Rückenbeschwerden erklären, nicht jedoch deren Entstehung.

Diese Muster der erhöhten bzw. verringerten Muskelaktivierung weisen, zumindest für kurze Zeit, durchaus adaptiven Charakter auf, da sie sich nicht nur auf den Umgang mit Schmerzerleben auswirken, sondern auch eine höhere Stabilität der Wirbelsäule zur Folge haben können (van Dieën, Cholewicki, & Radebold, 2003). Jedoch lassen sich darüber hinaus auch Muster der Muskelrekrutierung bei Rückenschmerzpatienten identifizieren, die auf eine veränderte motorische Kontrolle und maladaptive Strategien der Muskelaktivierung im Hinblick auf die Stabilisierung der Wirbelsäule hinweisen (Larivière et al., 2005). Eines dieser Muster zeigt sich in einem Ungleichgewicht der Muskelaktivierung zwischen der linken und rechten Seite der paraspinalen Muskulatur (van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003) und wird als muskuläre Dysbalance bezeichnet (Oddsson & Luca, 2003; Renkawitz et al., 2006). Aus der Studienlage kann aktuell nicht abgeleitet werden, ob muskuläre Dysbalancen Ursache oder Folge von Rückenbeschwerden sind. So wird zum einen postuliert, dass sie über die ungleiche Belastung zu höheren, auf die Bandscheiben und die knöchernen Anteile der Wirbelsäule wirkenden Kräften führen (Granata & Marras, 2000; Marras et al., 1999). Über diese unausgewogene Belastung der Wirbelsäule können in der Folge Rückenbeschwerden entstehen. Cram und Steger (1983) gehen dagegen davon aus, dass diese Muster der Muskelaktivierung als Reaktion auf Schmerz auftreten, um als Schutzmechanismus eine weitere Provokation von Schmerzen zu vermeiden. Auch nach van Dieën et al. (2003) stellen die muskulären Dysbalancen eine Reaktion auf eine bereits bestehende Beeinträchtigung dar, um eine höhere Stabilität der Wirbelsäule herzustellen, wobei die Autoren den Aspekt der asymmetrischen Aktivierung als zusätzlichen Hinweis auf eine bereits erfolgte Beeinträchtigung der motorischen Kontrolle interpretieren. Studien zum Vergleich muskulärer Dysbalancen bei Rückenschmerzpatienten und Gesunden weisen meist auf Unterschiede hin, jedoch konnten diese nicht durchgängig beobachtet werden. Während in einigen Studien höhere Dysbalancen in statischen Positionen

wie dem Sitzen und Stehen für Rückenschmerzpatienten belegbar waren (Hoyt et al., 1981; Triano & Luttges, 1985), fanden Ahern und Kollegen (1988) keine Unterschiede. Auch unter zusätzlicher körperlicher Belastung konnten höhere Dysbalancen im unteren Rücken unter einer Flexion und Extension des Oberkörpers bei Rückenschmerzpatienten aufgezeigt werden (Larivière et al., 2000; Larivière et al., 2005; Newcomer et al., 2002; Oddsson & Luca, 2003; Renkawitz et al., 2006; Triano & Schultz, 1987), jedoch nicht durchgängig in allen Studien (Nouwen et al., 1987; Reeves et al., 2006). Grabiner et al. (1992) stellten unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs der Muskelaktivierung während willkürlicher Kontraktionen eine deutliche zeitliche Versetzung der Aktivierung der links- und rechtsseitigen Muskulatur bei Rückenschmerzpatienten fest. Dies ist als weiterer Hinweis auf eine veränderte Ansteuerung der Muskulatur und der damit verbundenen motorischen Kontrolle zu interpretieren.

Unterschiede zwischen Gesunden und Rückenschmerzpatienten zeigten sich neben der Muskelaktivierung auch hinsichtlich der posturalen Kontrolle, der Bewegungsausführung und der Propriozeption. In Bezug auf die posturale Kontrolle tendieren Rückenschmerzpatienten dazu, eine größere Schwankungsbreite beim Stehen zu zeigen (Mazaheri et al., 2013), wobei dieser Effekt nicht bei allen Patienten auftrat. Für das Sitzen liegen neben Studien, die eine verschlechterte posturale Kontrolle bei Rückenschmerzpatienten belegten (van Daele et al., 2009) auch solche vor, die keine Unterschiede ergaben (van Dieën et al., 2010). Gemäß eines Reviews von C. Koch und Hänsel (2019) sind Unterschiede insbesondere unter schwierigen posturalen Bedingungen, wie dem Stehen auf einer instabilen Oberfläche oder fehlender visueller Information aufgrund geschlossener Augen belegbar. In diesen Situationen tendieren Rückenschmerzpatienten dazu, eine größere Schwankungsbreite zu zeigen. Bewegungen wie das Gehen werden häufig langsamer ausgeführt (Laird et al., 2014; Marras et al., 1999) und weisen weniger Variabilität auf (Lamoth et al., 2002). Aber auch eine größere Variabilität beim Gehen konnte bei Rückenschmerzpatienten beobachtet werden (Lamoth et al., 2006). Zudem war bei ihnen festzustellen, dass es im Vergleich zu gesunden Teilnehmern schwerer fiel, nach einer Perturbation wieder in die Ausgangsposition zurückzukehren (Brumagne et al., 2000) oder vorgegebene Zielpositionen einzunehmen (Gill & Callaghan, 1998), was auf verringerte propriozeptive Fähigkeiten schließen lässt (Tong et al., 2017). Somit kann von vielfältigen Unterschieden zwischen Gesunden und Rückenschmerzpatienten ausgegangen werden, eine ausschließliche Betrachtung von Unterschieden in der Muskelaktivierung würde also weitere Facetten der motorischen Kontrolle vernachlässigen. Dies ist umso bedeutsamer, als davon auszugehen ist, dass diese Effekte sich gegenseitig bedingen und interagieren (C. Koch & Hänsel, 2019). So traten bei Reaktionen auf Perturbationen, neben einer langsameren Reaktionszeit sowie

Schwierigkeiten, die Ausgangsposition wieder einzunehmen, auch deutlich abweichende Muster der Muskelrekrutierung bei Rückenschmerzpatienten auf (Radebold et al., 2000; Radebold et al., 2001; Willigenburg et al., 2013).

Die Erkenntnisse zu Unterschieden bei gesunden Teilnehmern und Rückenschmerzpatienten erweisen sich zusammenfassend als deutlich inkonsistent. Nach von Dieën et al. (2019) verweisen diese zum Teil widersprüchlichen Ergebnisse auf zwei Phänotypen der motorischen Kontrolle. Die eine Gruppe von Rückenschmerzpatienten weist eine *festere* motorische Kontrolle auf, die mit höherer Muskelaktivierung und geringerer Variabilität in den Bewegungen einhergeht. Die zweite Gruppe zeichnet sich durch eine *lockerere* Kontrolle aus, mit geringerer Muskelaktivierung und erhöhter Variabilität. Beide Muster können bei längerem Bestehen zu einer höheren Gewebebelastung führen. Bei der ersten Gruppe beispielsweise mündet dies über erhöhte Muskelaktivierung in eine intensivere Belastung der spinalen Strukturen, insbesondere der Bandscheiben, sowie in eine eingeschränkte Bewegungsvervielfältigung. Für die zweite Gruppe ist eine geringere Kontrolle über die Haltung und über Bewegungen charakteristisch. In der Folge auftretende, übermäßige Bewegungen können zu einer deutlichen Beanspruchung von Gewebestrukturen führen. Insbesondere beim Auslösen dieser Reaktionen durch nicht spezifische Trigger, wie psychosoziale Stressoren und individuelle Faktoren wie Angst, verlieren diese Muster ihren adaptiven Charakter und werden unangemessen lange aufrechterhalten (van Dieën et al., 2019).

2. Motorische Kontrolle unter kurzfristig wirksamen Stressoren

2.1 Stress: Begriffsbestimmung und Relevanz

Wie bereits gezeigt werden konnte, thematisiert eine Vielzahl von Modellen die Bedeutung von Stress für die Aktivierung der Rückenmuskulatur im Allgemeinen wie auch für die Entstehung von Rückenbeschwerden im Besonderen. Für ein Verständnis der hierbei wirksam werdenden Mechanismen sollen auf der Grundlage einer Begriffsbestimmung relevante Konzepte und Ergebnisse der Stressforschung vorgestellt werden. Dem Forschungsstand entsprechend, erscheint eine Differenzierung nach Stressoren, intraindividuellen Merkmalen und Prozessen sowie Ebenen der Stressantwort als sinnvoll. Everly und Lating (2019) unterscheiden im Rahmen eines multimodalen Ansatzes folgende miteinander interagierende Komponenten: Stressauslöser, kognitive Bewertungen und deren emotionale Integration, Trigger-Mechanismen in unterschiedlichen neuroanatomischen Strukturen, physiologische Stressantworten und deren Effekte auf Zielorgane sowie Coping-Verhalten. Die Frage, inwieweit Reize tatsächlich als Auslöser einer Stressantwort wirksam werden, hängt maßgeblich von subjektiven Bewertungsprozessen ab. Stress im Sinn eines transaktionalen Verständnisses liegt dann vor, wenn eine spezifische Beziehung zwischen einer Person und ihrer Umgebung subjektiv so bewertet wird, dass die damit verbundenen Anforderungen die verfügbaren Ressourcen übersteigen und das Wohlbefinden gefährden (Lazarus & Folkman, 1986). Unter Ressourcen werden hier sowohl intra- als auch extrapersonale Unterstützungs- und Schutzfaktoren verstanden.

Die physiologische Stressantwort, welche als Mediator zwischen den Stressoren und den Effekten auf Zielorgane wirksam wird, nutzt neuronale und endokrinologische Übertragungsmechanismen. Auf neuronaler Ebene sind sympathische, parasympathische und neuromuskuläre Prozesse beteiligt (Everly & Lating, 2019). Neben sofort wirksam werdenden Mechanismen im Rahmen einer Aktivierung der sympathiko-adrenomedullären Achse (SAM) des sympathischen Nervensystems lässt sich auf endokrinologischer Ebene die Bereitstellung von Energie für metabolische Prozesse, beispielsweise in der Muskulatur ansprechen, welche über die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse (HPA-Achse) gesteuert wird (Chrousos & Gold, 1992). Das Verständnis dieser beiden Stressachsen geht auf Cannon (1932) und Selye (1936) zurück. Cannon (1932) prägte den Begriff der Kampf-Flucht-Reaktion (*fight-or-flight response*), die eine Antwort auf eine Bedrohung des inneren Gleichgewichts, in der Terminologie von Cannon der Homöostase, durch innere und äußere Faktoren darstellt. Diese im Verständnis von Cannon unspezifische Stressreaktion wurde über die Aktivierung der SAM

erklärt. Später wurde die Kampf-Flucht-Reaktion durch Gray (1987) um die Komponente *freeze* ergänzt. Die von Selye (1936) in Tierversuchen nachgewiesenen, potenziell negativen Veränderungen im Organismus wurden über Prozesse im hormonellen System erklärt und stellten eine erste Verbindung zur später identifizierten HPA-Achse (D. S. Goldstein & Kopin, 2007) dar.

Wiederholte oder chronische Stressexposition lässt sich indes nicht nur, wie in der frühen Stressforschung, als Störung einer Homöostase verstehen. Das Konzept der *Allostatic Load* von Sterling und Eyer (1988) stellt adaptive Coping-Mechanismen der Anpassung von physiologischen Sollwerten in Abhängigkeit von gegebenen Anforderungen in den Mittelpunkt. Im Gegensatz zur Homöostase lässt sich Allostase als eine Stabilität verstehen, die aus Veränderung resultiert. Im Kontext der Wechselwirkungen zwischen psychologischen und physiologischen Faktoren lässt sich das Gehirn als zentrales Stressorgan charakterisieren, das sowohl Regulationsprozesse steuert als auch selbst Zielorgan von Stressreaktionen ist. Die funktionale allostatische Reaktion besteht darin, dass notwendige physiologische Prozesse wie die Energiebereitstellung ab dem Eintreten der Stressreaktion bzw. deren Antizipation einsetzen sowie nach deren Abschluss beendet werden. Dysfunktionale Reaktionen dagegen, wie eine unzureichende Adaptation oder verzögerte Rückkehr zu Ausgangswerten, bedingen eine erhöhte allostatische Last (McEwen, 1998) und können zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen wie koronaren Herzerkrankungen, Bluthochdruck, Stoffwechselstörungen und muskuloskelettalen Beschwerden führen (Steptoe, 2017).

Eine weitere bedeutsame Erweiterung des Stressverständnisses besteht darin, die ursprüngliche Annahme einer vom auslösenden Reiz und dem verarbeitendem Individuum unabhängigen, unspezifischen Stressreaktion aufzugeben (Pacak et al., 1998; Pacak, 2000). Hierbei spielten Befunde aus der psychophysiologischen Forschung eine wesentliche Rolle, die auf der Beobachtung einer hohen inter- und intraindividuellen Variabilität beruhten und in das Konzept der Reaktionsspezifität mündeten (Engel, 1960). In diesem Kontext werden Stressantworten hinsichtlich ihrer stimulus-, individual- und motivationsspezifischen Anteile differenziert eingeordnet (Fahrenberg, 1986; Hinz et al., 2000). Entsprechende Merkmalsausprägungen auf diesen Ebenen führen zu unterscheidbaren Mustern auf neuroendokriner, physiologischer und motorischer Ebene (Stern & Sison, 1990). Auf stimuluspezifischer Ebene etwa konnte gezeigt werden, dass physiologische Reaktionsmuster von Merkmalen der Situation und der auftretenden Stimuli abhängen (Fechir et al., 2008; Skoluda et al., 2015; Stephens et al., 2010; Weiner, 1992; Wilson et al., 1991). So fanden beispielsweise Fechir et al. (2008) Evidenz dafür, dass unterschiedliche Stressoren wie das Betrachten von negativen und positi-

ven Bildern, der Stroop-Test und eine Kopfrechenaufgabe zu unterschiedlichen Aktivierungsmustern des sympathischen Nervensystems führten. Die individualspezifische Komponente dagegen zeigt sich in Form konkordanter Response-Muster, welche in unterschiedlichen Situationen bzw. auf unterschiedliche Reize in Abhängigkeit von Merkmalen der Person auftreten (Childs et al., 2014; Engel, 1960; Lacey et al., 1952; Lacey & Lacey, 1958). Auf individualspezifischer Ebene konnten insbesondere für genetische Faktoren, Alter, Geschlecht, Stressvorgeschichte, Lebensstil und persönlichkeitsbezogene Variablen Einflüsse auf die Stressreaktivität nachgewiesen werden (Almela et al., 2011; Chida & Hamer, 2008; Kudielka et al., 2009; Otte et al., 2005; Steenhaut et al., 2018; Zänkert et al., 2019). Malmö (1949) prägte zudem den Begriff der Symptomspezifität, unter dem eine individualspezifische Reaktion im Kontext psychosomatischer Störungen verstanden wird (Flor & Turk, 1989; Fredrikson, 1991). Unter einer motivationsspezifischen Stressantwort sind schließlich die Anteile der Reaktion zu verstehen, die auf einen spezifischen Motivationszustand der Person zurückgehen und durch eine Interaktion der Situation und Bewertungsprozessen des Individuums entstehen können (Ax, 1964; Foerster et al., 1983). Anwendung findet das Konzept der Reaktionsspezifität insbesondere in der Verhaltensmedizin, um das Gesundheitsrisiko bestimmter Reizklassen oder individuelle Unterschiede hinsichtlich der Vulnerabilität für bestimmte Erkrankungen zu erklären (Berntson & Cacioppo, 2007; Dienstbier, 1989).

Stehen muskuläre Aktivierung und die Kontrolle von Haltung und Bewegung unter Stress im Mittelpunkt des Forschungsinteresses, so gilt es, die entsprechenden neuronalen und endokrinologischen Mechanismen genauer zu betrachten, um mögliche Pfade bei der Entstehung spezifischer Phänomene skizzieren und einordnen zu können. Die neuronale Steuerung der Skelettmuskulatur erfolgt über das somatische Nervensystem. Der zentrale Anteil umfasst hier neuronale Bahnen, die ihren Ursprung in präfrontalen und limbischen Strukturen des Gehirns sowie im Bereich des Hirnstammes haben und die im Rückenmark als pyramidale sowie extrapyramidale Bahnen verlaufen. Für die Steuerung der Muskulatur greifen beide ineinander (Kandel et al., 2013). Über pyramidale Bahnen erfolgt primär die willkürliche Steuerung mit Fokus auf fein dosierte Bewegungen und distal gelegene Muskeln. Extrapyramidal werden unwillkürliche Bewegungen wie beispielsweise Haltungsanpassungen gesteuert sowie, im Bereich der Extremitäten, grobe Bewegungen und proximal gelegene Muskeln. Im Bereich der Haltungsanpassungen sind insbesondere Orientierungs-, Ausweich- und Stützbewegungen des Rumpfes zu nennen. Zusätzlich regulieren extrapyramidale Neuronenketten den Tonus als Grundanspannung der Skelettmuskulatur. Der afferente Teil des somatischen Ner-

vensystems steht in Verbindung mit den Sinnesorganen, in Form von Riech-, Seh-, Hör-, Gleichgewichts- und Geschmacksbahnen und es innerviert über den efferenten Teil die Skelettmuskulatur (Lehmann-Horn, 2007; Trepel & Dalkowski, 2017). Stressbezogene Effekte lassen sich aufgrund der Beteiligung von präfrontalen und limbischen Strukturen an diesem Pfad in Form von kognitiven Bewertungen und deren emotionaler Integration plausibilisieren, sowie durch die Beteiligung des Hirnstammes, insbesondere der *Formatio reticularis*, in Form einer allgemeinen Aktivierung bzw. Arousal (Andreassi, 2007). Neben einer funktional sinnvollen Aktivierung in Vorbereitung auf Bewegung sind auch dysfunktionale Veränderungen möglich, etwa in Form übermäßiger Kontraktionen oder Spasmen (Dolce & Raczynski, 1985; Weil, 1974).

Auch das sympathische und parasympathische Nervensystem üben einen Einfluss auf neuromuskuläre Anpassungen unter Stress aus. Der Sympathikus bewirkt beispielsweise im Sinn der Kampf-Flucht-Reaktion über die SAM-Achse eine Vorbereitung auf Anforderungen, etwa durch eine erhöhte Durchblutung der Muskulatur (Roatta & Farina, 2010). Ebenso zeigen sich unter dem Einfluss der sympathischen Aktivierung eine angepasste Kontraktilität der Muskulatur, eine Modulation des Entladungsverhaltens der Muskelspindeln und damit einhergehender, veränderter Propriozeption sowie möglicherweise auch eine Veränderung der Nozizeption (Passatore & Roatta, 2006). Somit ist davon auszugehen, dass die neuromuskuläre Antwort auf Stress sich aus somatischen und sympathischen Anteilen zusammensetzt (Sibley et al., 2014; Staab et al., 2013).

2.2 Muskelaktivierung unter kurzfristig wirksamen Stressoren

2.2.1 Allgemeine Aspekte der Muskelaktivierung unter Stress

Angesichts der beschriebenen Steuerungsprozesse und Wirkmechanismen erscheint es als nachvollziehbar, dass eine erhöhte Muskelaktivität im Rücken aufgrund von kurzfristig einwirkenden Stressoren in zahlreichen Studien nachgewiesen werden konnte. Insbesondere für den Schulter- und Nackenbereich konnten bei Personen ohne muskuloskelettale Vorerkrankungen oder Beschwerden durch kognitive Stressoren wie dem Stroop-Test und Kopfrechenaufgaben, physiologische Stressoren wie dem Kälte-Druck-Test sowie durch unkontrollierbare Stressreize wie einen Elektroschock eine Erhöhung der mittleren Muskelaktivität, gemessen mit Oberflächen-Elektromyographie, nachgewiesen werden (Krantz, Forsman, & Lundberg, 2004; Luijckx et al., 2014; Lundberg et al., 1994; Lundberg et al., 2002). Um die Veränderung der Muskelaktivität auf den Einfluss von Stressoren zurückführen zu können, wur-

den diese Studien im Sitzen durchgeführt, ohne eine über die Haltungskontrolle hinausgehende körperliche Belastung. Auch im Rahmen von Studien im Sitzen mit leichter körperlicher Belastung, vergleichbar den Anforderungen an einem Büroarbeitsplatz, konnte eine durch eine zusätzliche psychische Anforderung ausgelöste Erhöhung der Aktivität der Schulter- und Nackenmuskulatur beobachtet werden (Laursen et al., 2002; Visser et al., 2004; Waersted et al., 1991; Wijsman et al., 2013). Während in diesen Studien die Stressexposition auf eine Zeitdauer von wenigen Minuten begrenzt war, verwendeten Nilsen et al. (2007) eine 60-minütige Auswahl-Reaktionszeit-Aufgabe, die unter Zeitdruck zu bearbeiten war. Auch hier trat im Bereich des oberen Trapezmuskels gegenüber der Baseline eine Erhöhung auf, nicht jedoch im Bereich des zusätzlich gemessenen Spleniusmuskels. Einen vergleichbaren Effekt im oberen Trapezmuskel erzielten Roman et al. (2013) durch eine je ca. 30-minütige Aufgabe zur Vigilanz und zur Daueraufmerksamkeit. Vergleichbare Effekte waren auch bei Feldstudien am Arbeitsplatz zu beobachten, in Form signifikant höherer Muskelaktivität im Schulter- und Nackenbereich aufgrund von erlebtem emotionalem Stress während der Messung (Rissen et al., 2000; Wahlström et al., 2003). Insgesamt ist das Bild insofern nicht einheitlich, als etwa Bansevicius, Westgaard und Jensen (1997), die eine Auswahl-Reaktionszeit-Aufgabe über einen Zeitraum von einer Stunde verwendeten, dabei keine deutliche Erhöhung in der mittleren Muskelaktivität im Nacken- und Schulterbereich nachweisen konnten.

Auch wenn sich in den meisten Studien eine Erhöhung der Muskelaktivität zeigt, erweist sich diese bei Betrachtung der absoluten Werte als gering. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass auch eine über einen längeren Zeitraum bestehende geringe Muskelaktivierung zur Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden beitragen kann. Eine mögliche Erklärung für diesen Zusammenhang stellt die sogenannte Cinderella-Hypothese dar (Hägg, 1991). Grundlage dieser Hypothese ist das Henneman-Größen-Prinzip, demzufolge bei ansteigender Kraftanforderung an einen Muskel motorische Einheiten in aufsteigender Größe aktiviert werden (Henneman et al., 1965; Henneman & Mendell, 2011). Bei geringer muskulärer Belastung werden hauptsächlich kleine motorische Einheiten aktiviert, die aus langsamen, ermüdungsresistenten Muskelfasern vom Typ I bestehen. Um Ermüdung zu vermeiden und höheren körperlichen Anforderungen zu begegnen, werden in der Folge normalerweise größere motorische Einheiten mit schnellen, kurzfristig ermüdbaren Muskelfasern vom Typ II rekrutiert. Bei sehr geringen Kraftanforderungen an den Muskel kann dieses Rotationsprinzip jedoch versagen, da aufgrund der Involvierung sehr weniger Muskelfasern die Rückkoppelung an das Zentralnervensystem über den Ermüdungszustand der Muskulatur ausbleibt. So blei-

ben diese Muskelfasern trotz Ermüdung weiterhin aktiviert, was über einen veränderten intramuskulären Blutfluss zu Zellschädigungen, einer verzögerten Reparatur der geschädigten Muskelfasern und Schmerzen führen kann (Hägg, 1991). Diese theoretische Annahme konnte in morphologischen Studien für den Bereich der Trapezmuskulatur partiell belegt werden (Hägg, 2000). Lundberg et al. (2002) wiesen darüber hinaus anhand intramuskulärer Messungen nach, dass sowohl unter psychischer als auch körperlicher Anforderung dieselben Muskelfasern aktiviert werden. Dies erhöht nach Meinung der Autoren das Risiko einer Überlastung dieser Muskelfasern an Arbeitsplätzen mit geringer körperlicher Anforderung und zusätzlicher psychischer Anforderung deutlich.

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, ist davon auszugehen, dass psychische Belastungen zu einer neuromuskulären Antwort führen. Aus biomechanischer Sicht kann ein Ziel dieser Kontraktionen eine Stabilisierung der Wirbelsäule sein (Laursen et al., 1998; van Loon et al., 2001). Neben der unmittelbar muskulären Stressantwort über das zentrale und somatische Nervensystem bedingen psychische Belastungen zusätzliche Stressantworten, etwa durch eine Aktivierung der sympathischen Anteile des autonomen Nervensystems. Dies führt auf muskulärer Ebene zu einer lokalen Ausschüttung von Katecholaminen, die nicht nur eine bessere Durchblutung bewirkt, sondern auch die Ermüdbarkeit der Typ-I-Muskelfasern verändert und damit den Cinderella-Effekt verstärken kann (Roatta & Farina, 2010). Hinweise für die Beteiligung des sympathischen Nervensystems ergeben sich aus Studien, die nachweisen konnten, dass die Muskelaktivierung sich in Abhängigkeit von der Intensität des Stressors erhöht. So nimmt die Anspannung im Trapezmuskelbereich mit steigender Anforderung an die Aufmerksamkeitsleistung zu (Waersted & Westgaard, 1996; Wixted & O' Sullivan, 2018), ein Effekt, der sich im Sinn einer Dosis-Wirkungs-Beziehung interpretieren lässt. Auch konnte beim Sitzen ohne zusätzliche körperliche Belastung ein direkter Zusammenhang zwischen der Aktivität des sympathischen Nervensystems und der Muskelaktivität im Trapezmuskel aufgezeigt werden (Krantz et al., 2004), allerdings ist dieser Zusammenhang in Studien mit körperlicher Belastung nicht durchgängig feststellbar (Rissen et al., 2000). Insgesamt zeigt sich so konsistent, dass bei gesunden Teilnehmern psychische Beanspruchung in Bedingungen mit geringer körperlicher Belastung, meist induziert über eine kognitive Aufgabe, zu einer Erhöhung der Muskelaktivität im Bereich des Trapezmuskels führt.

Es liegen nur wenige Befunde zur muskulären Stressreaktivität weiterer Muskelgruppen vor. Waerstad und Westgaard (1996) untersuchten die muskuläre Reaktivität von 20 Muskelgruppen unter einer komplexen Wahl-Reaktionsaufgabe und schlussfolgerten aus ihren Ergebnissen, dass die aufgabenbezogene Muskelaktivität vom Trapezmuskel aus in kaudaler

Richtung abnimmt. Jedoch zeigen Studien aus dem klinischen Kontext, die aus einem Vergleich der Stressreaktivität bei gesunden Teilnehmern und Rückenschmerzpatienten Rückschlüsse auf Reaktionsstereotypen unter Stress erlauben sollen, bei beiden Teilnehmergruppen Erhöhungen der Muskelaktivität unter psychischer Belastung nicht nur im Trapezmuskelbereich, sondern auch im thorakalen und lumbalen Bereich (Burns, 2006a; Flor et al., 1985; Glombiewski et al., 2008).

Neben Erkenntnissen zum Einfluss von psychischen Belastungen auf die Muskelaktivität bei geringen körperlichen Anforderungen liegen auch Ergebnisse zum Einfluss bei höheren körperlichen Belastungen vor. Bei höheren körperlichen Belastungen ist davon auszugehen, dass eine durch Stressoren induzierte Muskelaktivität zumindest teilweise von der aus der Bewegung resultierenden muskulären Aktivität überdeckt wird. Gleichwohl ließ sich für das Heben von Lasten unter zusätzlicher psychischer Belastung eine Erhöhung der Aktivität im Bereich des rechtsseitigen lumbalen *Musculus erector spinae* im Vergleich zum Heben der Last ohne zusätzlichem Stressor belegen (Marras, Davis et al., 2000). Zudem konnte nachgewiesen werden, dass eine kognitive Aufgabe, die vor einer körperlichen Aufgabe wie dem Heben einer Last zu bearbeiten ist, einen deutlich geringeren Einfluss auf die Muskelaktivierung ausübt als eine kognitive Aufgabe, die simultan zur körperlichen Aufgabe zu erfüllen ist (Davis et al., 2002). Im Schulter- und Nackenbereich zeigte sich unter einer Ziehbewegung eine zusätzliche Erhöhung der Aktivität des Trapezmuskels, wenn diese unter dem Einfluss einer gleichzeitigen Erinnerungsaufgabe durchgeführt wurde (Nimbarte et al., 2012).

Eine mögliche Erklärung für diese Befunde während der Durchführung einer Bewegung stellt die *Neuromotor Noise Theory* (van Galen et al., 2002; van Galen & van Huygevoort, 2000) dar. Bewegungen sind immer mit Ungenauigkeiten, einem Rauschen, verbunden. Um Bewegungen effektiv und genau auszuführen zu können, muss dieses Rauschen, das durch neurophysiologische, biomechanische und psychologische Prozesse bedingt ist, kontrolliert werden. Eine gleichbleibende motorische Leistung trotz Rauschen kann beispielsweise über eine Verlangsamung der Bewegung, Anpassung von Gelenkwinkeln oder auch eine Erhöhung der Muskelaktivität und einer damit einhergehenden höheren Steifigkeit der Gliedmaßen und Gelenke erreicht werden (Harris & Wolpert, 1998; van Galen & Jong, 1995; van Galen & Schomaker, 1992). In diesem Kontext wird diskutiert, ob insbesondere die unterstützende proximale Muskulatur, im Gegensatz zur ausführenden distalen Muskulatur, für die Reduktion des Rauschens genutzt wird (Bloemsaat et al., 2005). Dies scheint insbesondere für körperliche Aufgaben mit geringer Kraftanforderung zuzutreffen (Bloemsaat et al., 2005; Srinivasan et al., 2016; Waersted & Westgaard, 1996). So zeigte sich beispielsweise bei Bloemsaat et al. (2005)

während einer Tippbewegung mit dem Finger und einer zusätzlichen Kurzzeitgedächtnisaufgabe, dass sich neben der Oberarm- und Unterarmmuskulatur die Trapezmuskulatur am stärksten erhöhte. Diese Ergebnisse konnten punktuell auch bei höheren körperlichen Anforderungen wie einer Griffkraftaufgabe (Au & Keir, 2007) bestätigt werden, jedoch war der Effekt bei sehr hohen Präzisionsanforderungen nicht beobachtbar (Visser et al., 2004).

Zur muskulären Stressreaktivität im Sinne einer Erhöhung der Muskelaktivität, ohne eine differenzierte Betrachtung von links- und rechtsseitiger Aktivierung der paraspinalen Muskulatur, ist für einige Bereiche des Rückens somit eine konsistente Studienlage gegeben. Dagegen liegen nach dem Wissensstand der Autorin keine systematischen Untersuchungen zum Einfluss von kurzfristig wirksamen Stressoren auf muskuläre Dysbalancen der Rückenmuskulatur vor, wobei hier unter systematisch die Verwendung von in der Literatur definierten Ratios (Larivière et al., 2005; Oddsson & Luca, 2003) sowie die Einbeziehung mehrerer Muskelpaare über den gesamten Rücken hinweg verstanden wird. Zwar lassen sich aus Studien, die allgemein die Muskelaktivierung unter Stress untersuchten, Hinweise auf muskuläre Dysbalancen unter kurzfristig wirksamen Stressoren finden, einschränkend ist jedoch anzumerken, dass in diesen Studien die Muskelaktivität häufig nur einseitig gemessen (Krantz et al., 2004; Laursen et al., 1998; Lundberg, Forsman et al., 2002; Mclean & Urquhart, 2002; Roman-Liu et al., 2013; Sjörs et al., 2009; Visser et al., 2004; Wijsman, 2014; Wixted & O' Sullivan, 2018) oder aber die links- und rechtsseitige Aktivierung lediglich in gemittelter Form ausgewertet wurde (Burns, 2006a; Cohen et al., 1986; Glombiewski et al., 2008; Larsson et al., 1995; Lundberg et al., 1994; Nilsen et al., 2007). Bei einer weiteren Studie, die als Stressor einen Elektroschock verwendete, sind die Seitenunterschiede aufgrund der linksseitigen Verabreichung des Schocks nicht interpretierbar (Luijckx et al., 2014) und im Rahmen einer anderen Untersuchung wurde hinsichtlich der Stressreaktivität nur derjenige Ableitort in die Auswertung einbezogen, der die größere Reaktivität zeigte (DeGood et al., 1994). Bei mehreren Studien, die eine getrennte Auswertung der links- und rechtsseitigen muskulären Stressantwort vornahmen, trat ein vergleichbarer Anstieg der Muskelaktivierung auf beiden Seiten der Wirbelsäule auf (Bansevicius et al., 1997; Schleifer et al., 2008; Shahidi et al., 2013). Jedoch konnte Ekberg et al. (1995) bei einer Aufgabenbearbeitung mit der PC-Maus nur eine Erhöhung der Muskelaktivität in der Stressbedingung auf der linken, also der nicht aktiven Seite feststellen. Auch bei einer Studie von Laursen (2002), die eine Aufgabenstellung mit Verwendung einer PC-Tastatur zugrunde legte, stieg die Muskelaktivierung im Bereich des Trapezmuskels linksseitig stärker an. Ein gegenteiliger Effekt, in Form einer höheren rechts- als linksseitigen Zu-

nahme, war beim Tippen von Wörtern unter zusätzlicher kognitiver Anforderung zu beobachten (Leyman et al., 2004). Für den unteren Rücken war dagegen bei einer Hebeaufgabe unter Stress nur rechtsseitig eine signifikante Zunahme der Muskulatur festzustellen (Davis et al., 2002), allerdings war dieser unilaterale Effekt nur unter einfachen kognitiven Anforderungen zu beobachten. Dieses heterogene Bild unterstreicht den weiteren Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

2.2.2 Reaktionsspezifische Aspekte muskulärer Aktivierung

Ausgehend von dem bereits beschriebenen, allgemeinen Verständnis von Stress als einer spezifischen Reaktion des Organismus ist auch bei einer vertiefenden Betrachtung der Muskelaktivierung unter kurzfristig einwirkenden Stressoren die Rolle von reizspezifischen und individualspezifischen Aspekten von Bedeutung.

Reizspezifische Reaktion

Bezüglich einer reizspezifischen Antwort liegen für die Muskelaktivierung im Rücken nur wenige Erkenntnisse vor, jedoch weisen Befunde aus dem Bereich der Emotionsforschung auf eine mögliche muskuläre Reizspezifität hin. Schon in den 1950er Jahren konnten bei der Induktion der Emotionen Angst und Ärger Unterschiede in den physiologischen Antworten aufgezeigt werden, unter anderem für die Aktivierung des Frontalmuskels (Ax, 1953). Auch wenn aktuell kein Konsens besteht, ob Emotionen, in kategorialer Hinsicht betrachtet, zu distinkten physiologischen Mustern führen, ist zumindest von einem gewissen Grad an Spezifität im Hinblick auf eine dimensionale valenzspezifische Einordnung von Emotionen auszugehen (Kreibig, 2010; J. T. Larsen et al., 2008). So lässt sich beispielsweise die Annahme plausibilisieren, dass unterschiedliche muskuläre Aktivierungsmuster zu beobachten sind, je nach kognitiver und emotionaler Bewertung einer Situation als Herausforderung oder Bedrohung (Blascovich & Tomaka, 1995; Moore et al., 2013). Zu reizspezifischen Antworten der Rückenmuskulatur liegen aufgrund der Tatsache, dass meist nur ein Stressor und ein Ableitort untersucht wurden, insgesamt nur wenige Erkenntnisse vor. Auch eine systematische Unterteilung der Stressoren, etwa in kognitive, emotionale und soziale (Dickerson & Kemeny, 2004; Kemeny, 2003) erfolgte nicht. Für den Bereich des Trapezmuskels kann aus der im letzten Kapitel beschriebenen Studienlage geschlussfolgert werden, dass sich während geringer körperlicher Anforderungen in Abhängigkeit vom Schwierigkeitsgrad der kognitiven Aufgaben Erhöhungen zeigen (Krantz et al., 2004; Roman-Liu et al., 2013; Waersted & Westgaard, 1996; Wixted & O' Sullivan, 2018) und diese Aktivierung im unteren Bereich des Rückens geringer ausgeprägt

ist (Waersted & Westgaard, 1996). Burns et al. (2006a) konnten sowohl während eines ärger- als auch während eines traurigkeitsinduzierenden Interviews Erhöhungen der Muskelaktivierung im oberen und unteren Bereich des Rückens feststellen, allerdings wurden die beiden Emotionen nicht auf mögliche Unterschiede bezüglich ihrer Stressreaktivitäten verglichen. Somit ist davon auszugehen, dass emotionale Stressoren mit einer negativen Valenz sowohl im unteren als auch oberen Rücken eine erhöhte Muskelaktivierung auslösen.

Individualspezifische Reaktion

Die hohe interindividuelle Variabilität der Stressreaktionen kann auch auf individualspezifische Einflüsse wie Alter, Geschlecht, Persönlichkeitsvariablen sowie frühere Erfahrungen zurückzuführen sein, oder auch auf einen symptomspezifischen Einfluss in Form einer gegebenen Erkrankung wie etwa Rückenschmerz. Zu altersabhängigen Effekten auf die muskuläre Stressreaktivität liegen nur wenige Erkenntnisse vor. Laursen und Jensen (2000) konnten für verschiedene Aufgabenausführungen mit der Computermouse bei älteren Frauen mit einem mittleren Alter von 63 Jahren eine höhere Muskelaktivität im Trapezmuskel, aber auch eine größere Fehlerrate bei der Aufgabenbearbeitung und eine verlangsamte Bewegung, im Vergleich zu jüngeren Teilnehmerinnen mit einem mittleren Alter von 25 Jahren beobachten. Ein Vergleich der Stressreaktivität war nicht möglich, da sich die unterschiedlich zu bearbeitenden Aufgaben hinsichtlich der Muskelaktivierung nicht unterschieden. Die Autoren führen die höhere Muskelaktivität bei den älteren Teilnehmerinnen auf die höhere aufgebrachte Anstrengung zum Erfüllen der Präzisionsaufgaben bei dieser Gruppe zurück, welche auf eine allgemeine Abnahme der Fähigkeit zur motorischen Kontrolle mit fortschreitendem Alter zurückzuführen sein könnte (Seidler et al., 2010). Alkjaer et al. (2005) konkretisierten diesen Befund, indem sie die Muskelaktivität im Trapezmuskel und die Leistung bei zwei Aufgaben mit gleichbleibender physikalischer Belastung und sich deutlich unterscheidenden kognitiven Anforderungen bei jüngeren (mittleres Alter 25 Jahre) und älteren Teilnehmerinnen (mittleres Alter 64 Jahre) verglichen. Auch hier wurde als physikalische Aufgabe eine Bearbeitung mit der Computermouse gewählt. Die älteren Teilnehmerinnen zeigten in der kognitiv anspruchsvolleren Aufgabe einen deutlicheren Rückgang auf der Leistungsseite als die jüngeren Teilnehmerinnen sowie in beiden Bedingungen eine höhere Muskelaktivität, während für die jüngeren Teilnehmerinnen ein stärkerer Anstieg der Muskelaktivierung mit zunehmender kognitiver Belastung zu beobachten war. Dieser Effekt wurde jedoch nicht auf eine geringere Stressreaktivität bei älteren Teilnehmerinnen zurückgeführt, sondern auf deren Verhaltensstrategie zur Verringe-

rung der Aufgabenleistung und Bewegungsgeschwindigkeit bei der Bearbeitung. Diese Erkenntnisse weisen auf eine grundlegend höhere Muskelaktivität und eine verringerte motorische Kontrolle bei älteren Personen hin. In Bezug auf die Stressreaktivität auf muskulärer Ebene kann keine eindeutige Schlussfolgerung zu altersbedingten Unterschieden gezogen werden, da wohl unterschiedliche kompensatorische Strategien auf motorischer Ebene und auch in Bezug auf die Leistungserfüllung angewendet werden, um unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden der Aufgaben gerecht zu werden.

Zu der Frage, ob das Geschlecht einen Einfluss auf die Intensität der Muskelaktivität in statischen Positionen wie Stehen und dynamischen Bewegungen wie Hebeaufgaben hat, auch ohne den Einfluss von Stressoren, liegen keine konsistenten Befunde vor (Larivière et al., 2019). Im Bereich der muskulären Antworten auf Stress konnten weder Krantz et al. (2004) Unterschiede hinsichtlich der Stressreaktivität des Trapezmuskels im Sitzen bei unterschiedlichen Stressoren wie dem Stroop-Test, einer Kopfrechenaufgabe und dem Kälte-Druck-Test zwischen Männern und Frauen beobachten, noch fand die Forschergruppe um Marras (Marras, Davis et al., 2000) einen Unterschied in Bezug auf die Stressreaktivität der Rumpfmuskulatur während Hebeaufgaben und zusätzlichem psychosozialem Stress. Allerdings war ein allgemeiner geschlechtsspezifischer Einfluss feststellbar. Männer und Frauen zeigten eine unterschiedliche Muskelaktivierung sowohl in der Bauchmuskulatur als auch im unteren Rücken. In einer vergleichbaren Studie (Davis & Marras, 2003) konnte das Geschlecht ca. 40 % der Varianz der Muskelaktivität im unteren Rücken aufklären und stellte damit neben Faktoren wie Persönlichkeit, Anthropometrie, Gewicht der zu hebenden Last und Stressbedingung die Prädiktorvariable mit dem größten Einfluss dar (Davis & Marras, 2003). Neben Alter und Geschlecht wurden auch Variablen der Persönlichkeit zur Erklärung der interindividuellen Variabilität beleuchtet. Insbesondere für die Variable der Trait-Ängstlichkeit (Fridlund et al., 1986; Hoehn-Saric et al., 1997; Willmann et al., 2012) wurden Zusammenhänge zur Muskelaktivierung untersucht. So zeigte sich in einigen Studien für ängstlichere Personen sowohl im Bereich der Wadenmuskulatur als auch im Gesicht eine höhere allgemeine Muskelaktivität und eine intensivere Stressreaktivität (Hazlett et al., 1994; Hoehn-Saric et al., 1989). Auch gemittelt über mehrere Ableitorte war eine höhere Muskelaktivierung sowohl vor als auch während eines auditiven Stressors zu beobachten (Fridlund et al., 1986). Für den Bereich des Trapezmuskels konnten Willmann et al. (2012) dies allerdings nicht bestätigen, weder in der Baseline-Bedingung noch während eines Stroop-Tests waren Unterschiede zwischen hoch- und niedrig-ängstlichen Personen erkennbar. Somit liegen diesbezüglich für den Bereich des Rückens keine

klaren Belege für eine höhere allgemeine Muskelaktivierung und eine ausgeprägtere Stressreaktivität vor. Jedoch scheint der Grad der Ängstlichkeit bei Rückenschmerzpatienten bedeutsam zu sein, da Flor et al. (1985) bei deren Einteilung nach muskulären High- und Low-Respondern auf Stressbedingungen feststellten, dass sie sich in Bezug auf Ängstlichkeit, aber auch Depressivität, unterschieden und höher ängstliche und depressivere Rückenschmerzpatienten eine intensivere Muskelaktivität aufwiesen. Vergleichbare Effekte traten auch bei einer Studie von Burns und Kollegen (1997) zutage. Auf der Grundlage von Messungen der Muskelaktivität an sieben Ableitorten, darunter der rechte Trapezmuskel, stellte Goldstein (1964) im Bereich des Letzteren eine ausgeprägtere Stressreaktivität bei Depressiven fest als bei gesunden Teilnehmern. Unabhängig vom Stresskontext konnten Lewis et al. (2012) für Trait-Ängstlichkeit und Depressivität positive Zusammenhänge mit der Muskelaktivität sowie negative Zusammenhänge mit der Selbstwirksamkeitserwartung während einer leichten körperlichen Aufgabe zur Wiedererlangung einer vorgegebenen Position belegen. Weitere Studien von Marras und Kollegen sollten Hinweise zum Einfluss von Persönlichkeitsvariablen auf die Stressreaktivität bei gesunden Teilnehmer ergeben (Marras, Davis et al., 2000). Die Autoren verglichen die Muskelaktivierung der Rücken- und Bauchmuskulatur während einer Hebeaufgabe mit, respektive ohne, zusätzliche psychische Anforderung. So zeigten Personen, die entsprechend des typologischen Modells nach Myers-Briggs (Myers & McCaulley, 1992) eher den Introvertierten und Denkern zuzuordnen sind, eine höhere muskuläre Aktivierung unter Stress. Da der verwendete Myer-Briggs Type Indicator (MBTI) hinsichtlich der Gütekriterien nicht als akzeptabel eingestuft werden kann und zudem lediglich eine deskriptive Auswertung vorgenommen wurde, lassen sich die Ergebnisse nur sehr zurückhaltend interpretieren. Weitere Studien unter Verwendung des MBTI-Verfahrens von Davis und Marras (2003) sowie Nimbarte et al. (2012) ergaben ebenfalls Hinweise auf Zusammenhänge zwischen dieser Typologie und der Muskelaktivierung bei unterschiedlichen physischen Aufgaben. Somit liegt insbesondere für die Variablen der Ängstlichkeit und Depressivität Evidenz hinsichtlich der Beeinflussung der Stressreaktivität vor.

Neben persönlichkeitsbezogenen Variablen wurden in der Stressforschung traumatische Kindheitserfahrungen und eine damit einhergehende höhere Stresssensitivität im Erwachsenenalter als individualspezifische Komponente einbezogen (L. L. Carpenter et al., 2011; Heim et al., 2001; Teicher et al., 2003). Dies konnte von Luijks et al. (2016) auch auf der Ebene der muskulären Stressreaktivität nachgewiesen werden. Teilnehmer mit intensiveren traumatischen Kindheitserfahrungen zeigten eine höhere muskuläre Stressreaktivität im Bereich des Trapezmuskels. Außerdem hatten negative Erfahrungen in der Kindheit bis zu einem Alter von

elf Jahren einen größeren Einfluss, als wenn diese zu einem späteren Zeitpunkt der Kindheit und Jugend eintraten.

Als weiterer individualspezifischer, eigentlich symptomspezifischer, Faktor kann die Existenz von Rückenschmerzen betrachtet werden. Eine Reihe von Untersuchungen überprüfte bei Rückenschmerzpatienten die Annahmen des *Psychobiologischen Modells chronischer Schmerzsyndrome der Skelettmuskulatur* (Flor et al., 1985; Flor & Turk, 1984; Turk & Flor, 1984), demzufolge durch einen persönlich relevanten Stressor bei Rückenschmerzpatienten eine höhere muskuläre Stressreaktivität und höhere symptomspezifische Reaktionen in den Schmerzregionen des Rückens ausgelöst werden sollten, nicht jedoch in anderen Bereichen des Rückens oder des Körpers, wie etwa dem Kopf. Zu dieser Fragestellung ist die empirische Befundlage uneinheitlich. Während die Ergebnisse von Flor et al. (1985) diese reaktionsspezifischen Annahmen stützten, konnte in weiteren Studien eine symptomspezifische muskuläre Stressantwort für chronische Rückenschmerzen zwar im unteren Rücken bestätigt werden (Burns, 1997, 2006a; DeGood et al., 1994; Flor et al., 1985; Glombiewski et al., 2008), nicht jedoch für den Bereich des Nackens (Glombiewski et al., 2008; Sjörs et al., 2009). Es liegen auch Studien vor, die keine Unterschiede bezüglich der Stressreaktivität zwischen gesunden Teilnehmern und Rückenschmerzpatienten nachweisen konnten (Cohen et al., 1986; Collins et al., 1982; Soderberg & Barr, 1983). Während bei Flor et al. (1985) sich diese Stressreaktivität insbesondere bei persönlich relevanten Stressoren zeigte, konnten Glombiewski et al. (2008) dies nicht replizieren. Die Rückenschmerzpatienten zeigten sowohl während eines persönlich relevanten Stressors, der als Imagination eines als stressvoll erlebten Ereignisses operationalisiert wurde, als auch während einer kognitiven und sozialen Aufgabe, eine höhere Stressreaktivität als gesunde Teilnehmer. Auch DeGood et al. (1994) schlussfolgerten aufgrund ihrer Ergebnisse zu höherer Muskelaktivierung nur durch das Aufsagen des Alphabets, dass eher eine allgemeine Aktivierung durch das Sprechen als eine reizspezifische Reaktion für die höhere Muskelaktivierung bei Rückenschmerzpatienten verantwortlich sei. Hinsichtlich muskulärer Dysbalancen schließlich liegen für Rückenschmerzpatienten unterschiedliche Befunde vor. Collins et al. (1982) bildeten Differenzwerte aus der links- und rechtsseitigen Muskelaktivierung und fanden im Vergleich von Rückenschmerzpatienten und einer Kontrollgruppe keine Unterschiede dieser Differenzwerte über verschiedene körperliche Aufgaben und auch eine Kopfrechenaufgabe hinweg. Bei der Studie von Flor et al. (1985) zeigte sich während der Baseline linksseitig bei Rückenschmerzpatienten eine höhere Aktivierung im unteren Rücken, nicht jedoch rechtsseitig. Beide Seiten zeigten während verschiedener Stressoren eine ver-

gleichbare muskuläre Reaktivität. Hinsichtlich der Werte in den auf Stressbedingungen folgenden Erholungsphasen war bei den Rückenschmerzpatienten linksseitig ein langsamerer Rückgang der Aktivierung als rechtsseitig zu beobachten. Interessanterweise trat dieser Effekt insbesondere nach emotionalen Stressoren wie einem ärgerinduzierenden Interview oder dem Erinnern einer schmerzvollen und als stressig erlebten Situation auf (Burns, 2006a; Flor et al., 1985). Für Rückenschmerzpatienten lässt sich somit resümieren, dass im Vergleich zu gesunden Teilnehmer gerade im Bereich des unteren Rückens ausgeprägtere Reaktionen auf Stress feststellbar sind.

2.3 Haltungskontrolle und Bewegung unter kurzfristig wirksamen Stressoren

Wie dargestellt, üben kognitive und emotionale Stressoren einen Einfluss auf die Muskelaktivierung aus und können so zur Entstehung und Aufrechterhaltung muskuloskelettaler Beschwerden beitragen. Ebenso ist davon auszugehen, dass die biomechanische Beanspruchung über eine Veränderung von Haltung, Bewegung und aufgewendeten Kräften durch eine Stressreaktion direkt beeinflusst wird (Bongers et al., 2002; Sauter & Swanson, 1996). Vor diesem Hintergrund ist es von Interesse, wie sich Haltungskontrolle, insbesondere im Sitzen und Stehen, sowie Bewegung und Zielmotorik unter kurzfristigem Stress verändern. Als Stressoren stehen kognitive Aufgaben und emotionale Stimuli unterschiedlicher Valenz sowie Arousal im Mittelpunkt. Zusätzlich werden neben allgemeinen auch reaktionsspezifische Aspekte stressbedingter Veränderungen von Mustern der Haltungs- und Bewegungskontrolle berücksichtigt.

2.3.1 Allgemeine Aspekte von Haltungskontrolle und Bewegung unter Stress

Für die Fragestellung dieser Arbeit sind Veränderungen der motorischen Kontrolle bei der Haltung und Bewegung aufgrund zusätzlicher kognitiver oder emotionaler Belastungen von besonderer Bedeutung. Studien, die diesen Untersuchungsgegenstand in den Mittelpunkt stellen, wird häufig ein Dual-Task-Untersuchungsparadigma zugrunde gelegt, also die gleichzeitige Bearbeitung zweier Aufgaben mit Erfassung der daraus resultierenden Wechselwirkungen (Bayot et al., 2018; McIsaac et al., 2015; Plummer & Eskes, 2015). Die gegenseitige Beeinflussung der Leistung bei den einzelnen Aufgaben wird als Interferenz bezeichnet und kann, neben keiner Veränderung bei beiden Leistungsarten, auch eine Verbesserung oder Verschlechterung der Leistung nach sich ziehen, sei es bei einer der Aufgaben oder bei beiden (Plummer et al., 2013). Im Rahmen von Dual-Task-Untersuchungen wird nicht immer berücksichtigt, ob Doppelaufgaben auf subjektiver und physiologischer Ebene zu Reaktionen führen, die sich im Sinn einer Stressantwort interpretieren lassen. Jedoch kann davon ausgegangen

werden, dass Aufgaben und Stimuli, die vergleichbar zu denen sind, die bei Studien zur Untersuchung von primär muskulären Stressantworten verwendet werden, auch in diesem Kontext stressbezogene Antworten bedingen. Im Folgenden sollen, in den für diese Arbeit relevanten Ausschnitten, Erkenntnisse zum Einfluss von kognitiven Aufgaben und emotionalen Stimuli zunächst auf die Haltungskontrolle und anschließend auf Bewegung dargestellt werden.

Unter posturaler Kontrolle wird das Erreichen, Beibehalten oder Wiederherstellen einer aufrechten Körperhaltung und Balance unter dem Einfluss der Schwerkraft verstanden (Pollock et al., 2000). Die in diesem Kontext bei statischen körperlichen Anforderungen, wie dem Sitzen oder Stehen, häufig berücksichtigten Parameter beziehen sich auf Veränderungen der Lage eines gemessenen Massenschwerpunkts (COM) oder eines Druckmittelpunkts (COP) und deren Schwankungsverhalten, einschließlich der zu beobachtenden Amplitude und Schwankungsfrequenz (Witte, 2018). Bei gesunden Teilnehmern liegen inkonsistente Befunde zur Veränderung der posturalen Kontrolle unter kognitiver Beanspruchung hinsichtlich des Schwankwegs vor. So konnten sowohl ein längerer Schwankweg in mediolateraler und anteriorposteriorer Richtung (Pellecchia, 2003; Raymakers et al., 2005; Woollacott & Shumway-Cook, 2002) als auch unveränderte oder reduzierte Spurlängen (Hunter & Hoffman, 2001; Huxhold et al., 2006; Prado et al., 2007; Swan et al., 2007) beobachtet werden. Ein den Schwankweg beeinflussender Parameter scheint die Aufgabenschwierigkeit zu sein. Während einfache und auch sehr schwierige kognitive Aufgaben die Haltungskontrolle in dem Sinne verändern, dass sich Schwankwege verlängern, bedingt eine mittlere Schwierigkeit eher deren Verkürzung, was zum Postulat eines U-förmigen Zusammenhangs führte (Lacour et al., 2008). Bei einfachen kognitiven Aufgaben könnte der Versuch einer bewussten Steuerung für die längeren Schwankwege verantwortlich sein. Die dagegen bei mittleren Schwierigkeitsgraden auftretenden kürzeren Schwankwege sind durch eine Lenkung der Aufmerksamkeit weg von der motorischen Aufgabe und einer damit einhergehenden stärker automatisierten und effizienteren Ausführung zu erklären (Riley et al., 2003). Dies geht mit einer größeren Steifigkeit und einer engeren motorischen Kontrolle einher (Andersson et al., 2002), was sich in einem geringeren Schwankweg, einer höheren Schwankungsfrequenz und einer intensiveren Muskelaktivität in den unteren Gliedmaßen äußert (Stins et al., 2011). Dieses Phänomen wird von einigen Autoren als *Posture first* Prinzip bezeichnet, im Sinn einer Priorisierung zugunsten der Haltungskontrolle gegenüber der kognitiven Aufgabe (Albertsen et al., 2017; Shumway-Cook et al., 1997; Siu & Woollacott, 2007). Nach Stoffregen et al. (1999) kann die Haltungskontrolle zusätzlich in einen funktionalen Zusammenhang eingeordnet werden, mit dem Zweck, über deren Verbesserung das Lösen von zusätzlichen Aufgaben zu erleichtern. Dagegen kann die bei

schwierigen kognitiven Aufgaben zu beobachtende Interferenz mit längeren Schwankwegen, einer höheren Schwankfrequenz und verringerten kognitiven Leistungen im Sinne einer begrenzten Verarbeitungskapazität interpretiert werden (Dault et al., 2001; Tombu & Jolicoeur, 2003; Woollacott & Shumway-Cook, 2002).

Bei der Durchführung kognitiver Aufgaben im Sitzen konnten, in Abhängigkeit von der Aufgabenschwierigkeit, Veränderungen nicht nur des Schwankverhaltens, sondern auch der Haltung des Oberkörpers im Sinne eines im Mittel verlagerten Kraftangriffspunktes beobachtet werden, gemessen durch eine Veränderung der Winkelstellung der Gelenke oder mithilfe von Druckmessfolien. So wurde der Kopf bei der Bearbeitung subjektiv stressvoll erlebter kognitiver Aufgaben weiter nach vorne gebeugt (Shahidi et al., 2013). Interessanterweise konnten die Autoren keinen linearen Zusammenhang zwischen veränderter Kopfhaltung und Aktivierung der Schulter- und Nackenmuskulatur finden. Dies lässt auf eine zumindest teilweise von der Bewegung unabhängige Aktivierung der Muskulatur unter Stress schließen. Zudem fanden Arnrich et al. (2010) bei der Bearbeitung des *Montreal Imaging Stress Test* (Dedovic et al., 2005) bei ca. 80 % der Teilnehmer eine höhere Bewegungsvarianz im Sitzen, während die restlichen 20 % eine deutlich geringere aufwiesen. Auch bei der mehrmaligen Durchführung des Stroop-Tests mit immer kürzer werdenden Zeitintervallen zwischen den Stimuli konnte eine interindividuelle Variabilität beobachtet werden. 30 % der Teilnehmer behielten eine empfohlene ergonomische Sitzhaltung bei, jedoch lehnten sich die anderen Teilnehmer entweder nach vorne oder hinten (Bibbo et al., 2019).

Neben den Befunden zum Einfluss kognitiver Aufgaben auf die posturale Kontrolle liegen auch entsprechende Erkenntnisse zur Rolle emotionaler Stimuli vor. Die Induktion emotionaler Zustände erfolgt meist über Filme, Bilder und Musik sowie über eine Veränderung der Situation, indem Teilnehmer beispielsweise auf einer erhöhten Plattform stehen, oder auch über Imaginationsaufgaben. Bei der Untersuchung des Einflusses emotionaler Stimuli auf die motorischen Systeme werden diese meist unter dem Aspekt ihrer Valenz und damit verbundenen motivationalen Tendenzen eingeordnet. So wird angenommen, dass angenehme Stimuli ein Annäherungsverhalten und unangenehme Stimuli ein Vermeidungsverhalten auslösen können und sich in einer Verlagerung der Haltung nach vorne bzw. hinten widerspiegeln (Bradley et al., 2001; Stins & Beek, 2007). Dies konnte von Hillmann et al. (2004) teilweise bestätigt werden, jedoch mit geschlechtsspezifischen Unterschieden. Männer lehnten sich beim Betrachten von Bildern mit negativer Valenz leicht nach vorne, wohingegen Frauen die Tendenz zeigten, sich nach hinten zu lehnen. Neben diesen beiden Mustern trat insbesondere bei angst- und ekelauslösenden Stimuli eine *Freezing*-Reaktion auf, charakterisiert durch eine

Phase der motorischen Immobilität (Azevedo et al., 2005; Facchinetti et al., 2006; Stins & Beek, 2007). Auf der Ebene der posturalen Parameter ist die Freezing-Reaktion durch eine geringere Amplitude des Schwankwegs sowohl mediolateral als auch anterioposterior sowie durch eine höhere mittlere Schwankungsfrequenz gekennzeichnet. So fanden Stins und Beek (2007) für Bilder mit stark negativer Valenz in der anspruchsvollen Haltung des einbeinigen Stehens reduzierte Schwankungsbreiten. Dies war ebenso beim Betrachten von ärgerlichen Gesichtsausdrücken (Roelofs et al., 2010) und angstausslösendem Filmmaterial zu beobachten (Hagenaars et al., 2014). Zusammenfassend zeigt sich in Konfrontation mit emotionsauslösendem Bildmaterial häufig eine Freezing-Strategie, wobei auch Lageänderungen des Körpers nach vorne oder hinten beziehungsweise größere Schwankungsbreiten zu beobachten sind (Lelard et al., 2019). Interessanterweise wurde die posturale Kontrolle nicht nur von der Valenz eines Reizes, sondern auch durch das Arousal beeinflusst (Horslen & Carpenter, 2011). So erhöhte sich die Schwankungsfrequenz in anterioposteriorer Richtung beim Betrachten von affektiven Bildern in Abhängigkeit vom induzierten Arousal, nicht jedoch der Valenz. Neben einer Induktion durch Bildmaterial kann der emotionale Zustand über das Stehen auf einer erhöhten Plattform beeinflusst werden. So reagierten die Teilnehmer mit einem Wegleihen vom Rand der Plattform sowie, vergleichbar der Freezing-Reaktion bei emotionalem Bildmaterial, mit einem verkürzten Schwankweg und einer erhöhten Schwankfrequenz (Adkin et al., 2000; M. G. Carpenter et al., 1999; M. G. Carpenter et al., 2001). In Verbindung mit einer intensiveren Muskelaktivierung in den Beinen dient diese Strategie der Erhöhung der Steifigkeit der Gelenke und stellt damit einen Schutz vor dem Verlust der Balance dar (Adkin & Carpenter, 2018). Auch Imaginationsaufgaben zu emotionalen Inhalten üben einen Einfluss auf die posturale Kontrolle aus, wobei diese Methode der Emotionsinduktion seltener untersucht wurde (Lelard et al., 2013; Lelard et al., 2019). Beispielsweise verkürzte sich der anterioposteriore Schwankweg und erhöhte sich Muskelaktivität in den Beinen durch die mentale Vorstellungsaufgabe, sich in einer schmerzhaften Situation zu befinden (Lelard et al., 2013).

Kognitive und emotionale Stressoren üben neben der Stützmotorik auch einen Einfluss auf die Zielmotorik aus und können sich beispielsweise durch Veränderungen in den aufgebrauchten Kräften, der Beschleunigung und Bewegungsgeschwindigkeit sowie der Variabilität der Bewegung zeigen (Al-Yahya et al., 2011; Wahlström et al., 2002). Hierfür lassen sich Studien zu unterschiedlichen Facetten von Zielmotorik anführen. So wurden, in Relation zu Kontrollbedingungen, beim Bedienen einer Computermouse unter Zeitdruck oder sozialer Bewertung höhere aufgebrauchte Kräfte und schnellere Bewegungen des Handgelenks beobachtet (Visser et al., 2004; Wahlström et al., 2002). Vergleichbare Effekte hinsichtlich aufgebrauchter

Kräfte und eine zusätzlich höhere Bewegungsvariabilität zeigten sich unter Zeitdruck auch bei Zielbewegungen, die mit einem Stift auszuführen waren (van Galen & van Huygevoort, 2000). Auch beim Heben von leichten Lasten konnte ein deutlicher Einfluss von zusätzlicher kognitiver Beanspruchung auf kinematische Variablen wie Positionierung, Bewegungsgeschwindigkeit und Beschleunigung des Oberkörpers gemessen werden (Davis et al., 2002; Davis & Marras, 2003; Marras, Davis et al., 2000). In Verbindung mit einer erhöhten Aktivierung der unteren Rücken- und Bauchmuskulatur ergaben sich so in der Bewegung mit zusätzlichem Stressor, bei Berechnung mit einem muskuloskelettalen Menschmodell, höhere wirkende Kräfte auf die spinalen Strukturen als in der Kontrollbedingung. Ebenso war bei statischen Halteaufgaben der Einfluss einer zusätzlichen mentalen Beanspruchung belegbar. Neben Veränderungen der Muskelaktivierung waren insbesondere unter Bedingungen intensiver körperlicher Beanspruchung während einer Kopfrechenaufgabe höhere Kraftfluktuationen (Mehta et al., 2012; Mehta & Agnew, 2011) sowie während des Stroop-Test eine verringerte Griffkraft (Au & Keir, 2007) beobachtbar. Nach dem Einfluss kognitiver Aufgaben soll auch die Rolle emotionaler Aspekte vertieft betrachtet werden. So stellten Chen und Bargh (1999) fest, dass das Ziehen und Drücken eines Hebels durch das Betrachten von Bildern, die als angenehm oder unangenehm wahrgenommen werden, beeinflusst wird. Konkruente Bewegungen, also das Ziehen eines Hebels hin zur Person bei positivem Bildmaterial und dessen Wegdrücken bei negativem Bildmaterial, wurden schneller ausgeführt als inkongruente. Ebenso konnten Coombes et al. (2007a, 2007b; 2008) in einer Reihe von Studien den Einfluss emotionaler Stimuli auf das Auslösen und die Durchführung von Extensionsbewegungen der oberen Extremitäten nachweisen. Im Vergleich zu Bildern mit neutraler emotionaler Valenz gingen Reaktionen auf Bilder mit stark emotional negativer Valenz mit einer kürzeren Reaktionszeit einher. Bilder mit entweder stark emotional positiver oder stark emotional negativer Valenz zusätzlich mit einer höheren Kraftproduktion.

Intensiv beforscht wurde auch der Bewegungsablauf des Gehens mit gleichzeitig zu bearbeitenden kognitiven Aufgaben. Als leistungsbezogene Parameter auf der Ebene Gehens wird meist die Gehgeschwindigkeit erfasst, aber auch Parameter wie Schrittlänge, Schritte pro Minute und Bewegungsvariabilität berücksichtigt (Al-Yahya et al., 2011). Zusammenfassend kann als gesichert angesehen werden, dass das Ausführen von Doppelaufgaben während des Gehens sowohl bei jüngeren als auch bei älteren Teilnehmern zu Dual-Task-Kosten bei einer oder auch bei beiden Aufgaben führt (Beauchet et al., 2005; Dubost et al., 2006; Yogev-Seligmann et al., 2008). Bei gesunden jungen Erwachsenen verringert sich unter Dual-Task-Bedingungen meist die Gehgeschwindigkeit, die Trittfrequenz, die Schrittlänge und es erhöhen sich

die Schrittzeit und deren Variabilität (Al-Yahya et al., 2011; Beauchet et al., 2005; Dubost et al., 2006; Patel et al., 2014). Neben den Auswirkungen kognitiver Stressoren auf Parameter der Bewegung liegen auch Erkenntnisse zum Einfluss emotionaler Stimuli vor. Michalak et al. (2009) konnten beim Bewegungsmuster des Gehens Veränderungen durch die Induktion von positiver und negativer Stimmung durch Musik aufzeigen. Bei der Induktion von Traurigkeit beispielsweise war eine geringere Gehgeschwindigkeit zu beobachten. Auch die Initiation der Gehbewegung kann durch emotionale Stimuli beeinflusst werden. So erfolgt nach der Betrachtung von standardisiertem Bildmaterial, das hohes Arousal und hohe negative Valenz induziert, eine schnellere motorische Antwort und damit eine schnellere Initiierung der Gehbewegung (Naugle et al., 2011).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass kognitive Aufgaben und emotionale Stimuli die Haltungskontrolle und Bewegung bei gesunden Teilnehmern deutlich beeinflussen, wobei nicht immer ein einheitliches Reaktionsmuster zu erkennen ist. Allerdings zeigt sich im Kontext der Haltungskontrolle bei kognitiven Aufgaben mittleren Schwierigkeitsgrades und bei intensiven emotionalen Stimuli häufig eine Steifigkeitsreaktion, die zusätzlich über Messungen der Muskelaktivität in den Beinen validiert werden konnte (Adkin & Carpenter, 2018; Lelard et al., 2013; Stins et al., 2011). Inwiefern diese auch zu einer höheren muskulären Aktivierung im gesamten Bereich des Rückens führen und auf welche Weise eventuelle Veränderungen der Muskelaktivierung im Rücken mit Veränderungen der posturalen Kontrolle einhergehen, ist aktuell noch unklar. Bei Bewegungen zeigen sich Veränderungen der Geschwindigkeit, der aufgebrachten Kräfte und der Variabilität. Insbesondere bei Präzisionsbewegungen ist unter Stress ein höherer Krafteinsatz, der mit einer höheren Muskelaktivierung einhergeht, zu beobachten. Das Gehen wird unter Dual-Task-Bedingungen häufig langsamer ausgeführt (Al-Yahya et al., 2011). Auch dies spricht für eine kontrolliertere Bewegung. Aufgrund der hohen Variabilität der Ergebnisse und der teilweisen Widersprüchlichkeit kann jedoch nicht von einem singulären Reaktionsmuster ausgegangen werden.

2.3.2 Reaktionsspezifische Aspekte von Haltungskontrolle und Bewegung unter Stress

Wie schon bei der Stressreaktion auf muskulärer Ebene sollen auch in Bezug auf die Haltungskontrolle und Bewegung reaktionsspezifische Aspekte beleuchtet werden. Neben dem differentiellen Einfluss unterschiedlicher Stressoren werden auf individualspezifischer Ebene mögliche Einflüsse des Alters, Geschlechts, der Persönlichkeit sowie des Gesundheitszustandes in Bezug auf Rückenbeschwerden diskutiert.

Reizspezifität

Zum Einfluss sich unterscheidender Reize auf die posturale Kontrolle liegen sowohl für kognitive als auch emotionale Stimuli Erkenntnisse vor. So lassen sich bei kognitiven Aufgaben kontinuierliche und diskrete Aufgabenstellungen unterscheiden. Während kontinuierliche Aufgaben, wie durchgängige Zähl- und Kopfrechenaufgaben, zu einer Verbesserung der posturalen Kontrolle führten, blieb dieser Effekt bei diskreten Aufgaben wie einer *Go/No-Go*-Aufgabe aus (Lajoie et al., 2016). Dies ist vermutlich auf die bereits im letzten Abschnitt ausgeführte Verbesserung der posturalen Kontrolle durch die automatisiertere und damit effizientere Ausführung der posturalen Kontrolle zurückzuführen, die auch beim zusätzlichen Bearbeiten von Aufgaben mit mittleren kognitiven Anforderungen zu beobachten ist. Zur Beeinflussung der posturalen Kontrolle durch emotionale Stimuli, wie Bildmaterial unterschiedlicher Valenz, liegen inkonsistente Befunde vor. Einerseits ergaben Studien für sehr unangenehmes und ekelauslösendes Bildmaterial eine deutliche Freezing-Reaktion, nicht aber für angenehme Reize (Azevedo et al., 2005; Stins & Beek, 2007), in anderen Studien konnte jedoch auch bei Letzteren eine Reaktion ähnlich dem Freezing beobachtet werden (Facchinetti et al., 2006). Die Reaktion auf emotionales Bildmaterial scheint, neben der Valenz, deutlich von der Induktion von Arousal abzuhängen. Darauf lässt auch eine Untersuchung von Horslen und Carpenter (2011) schließen, bei der ein intensiveres Arousal, unabhängig von der Valenz, mit einer erhöhten Steifigkeitsreaktion einher ging. Stins et al. (2011) widmeten sich der Frage, ob Steifigkeitsreaktionen von der Art ihrer Induktion abhängen und verglichen dabei den Einfluss mittelschwerer kognitiver Aufgaben sowie des Stehens auf einer erhöhten Plattform, und damit einer Veränderung des emotionalen Zustands. In dieser Studie, die zusätzlich zum Schwankungsverhalten auch die Aktivierung der Beinmuskulatur berücksichtigte, konnten deutliche Unterschiede zwischen den Reaktionen beobachtet werden. Während sich beim Stehen auf einer erhöhten Plattform die Steifigkeitsreaktion bereits als antizipatorischer Kontrollmechanismus darstellte, verbunden mit stärkerer Aufmerksamkeitslenkung hin zur posturalen Kontrolle und erhöhter Muskelaktivierung, führte die kognitiv-motorische Dual-Task-Bedingung zu einer weniger bewussten Kontrolle der Haltung.

Beim Gehen als weiterer motorischer Aufgabe, neben der posturalen Kontrolle, hängen kognitiv-motorische Interferenzen erkennbar von der Komplexität der Aufgabe und dem jeweils involvierten kognitiven Funktionsbereich ab. Schwierigere kognitive Aufgaben, die eine selektive Aufmerksamkeit und Inhibitionsprozesse erfordern, wie der Stroop-Test, werden gegenüber einer motorischen Aufgabe priorisiert, bei leichten kognitiven Aufgaben, wie einer

visuomotorischen Reaktionszeitaufgabe, erfolgt die Priorisierung zugunsten des Gehens (Almajid & Keshner, 2019; Patel et al., 2014). Insgesamt verursachen so kognitive Aufgaben, die Aufmerksamkeitsprozesse und exekutive Funktionen beanspruchen, ausgeprägtere Dual-Task-Kosten auf motorischer Ebene als Aufgaben, die nur eine automatisierte zentralnervöse Verarbeitung erfordern (Almajid & Keshner, 2019; Al-Yahya et al., 2011). Auch Hebeaufgaben werden durch die Aufgabenschwierigkeit beeinflusst. Davis et al. (2002) untersuchten den differentiellen Einfluss von einfacher und komplexer kognitiver Belastung, die vor oder während einer Hebeaufgabe auftrat. Auch wenn die kognitive Belastung vor der motorischen Aufgabe einen Einfluss auf Parameter der Bewegung ausübte, zeigte sich dieser erkennbar ausgeprägter bei gleichzeitiger Durchführung beider Aufgaben und der komplexen und damit schwierigeren Aufgabe. Für emotionale Stressoren lassen sich bei Extensionsbewegungen Unterschiede in Abhängigkeit von der Valenz aufzeigen, insbesondere hinsichtlich der Bewegungsgeschwindigkeit. Diese wurde am deutlichsten durch stark unangenehmes und bedrohliches Bildmaterial beeinflusst (Coombes et al., 2007a, 2007b; Coombes et al., 2008). Dagegen hing bei Griffkraftaufgaben die Kraftproduktion nicht von der Valenz des emotionalen Stimulus ab. Sowohl angenehme als auch unangenehme Reize übten einen vergleichbaren Einfluss aus (Coombes et al., 2008). Dies lässt sich als ein Hinweis auf den Einfluss von Arousal, unabhängig von der Valenz, interpretieren.

Individualspezifisch

Auf der Ebene individualspezifischer Aspekte werden, neben Alter und Geschlecht auch Persönlichkeitsvariablen wie Ängstlichkeit und der Vergleich zwischen Gesunden und Rückenschmerzpatienten mit einbezogen. In zahlreichen Studien konnte demonstriert werden, dass ältere Personen höhere Dual-Task-Kosten bei kognitiv-motorischen Doppelaufgaben aufweisen (Al-Yahya et al., 2011; Lacour et al., 2008). Hinsichtlich der posturalen Kontrolle ließen sich bei älteren und jüngeren Teilnehmern, anhand von Vergleichen zwischen 70- und 25-Jährigen beziehungsweise zwischen 77- und 57-Jährigen, bei der gleichzeitigen Durchführung schwieriger kognitiver Aufgaben größere Abweichungen vom Druckmittelpunkt bei den jeweils Älteren feststellen, sowohl im Stehen als auch im Sitzen (Huxhold et al., 2006; Maylor & Wing, 1996). Weitere Unterschiede zeigten sich beim Wiedererlangen einer ruhigen Stehposition, nach Perturbationen oder destabilisierenden Bewegungen wie dem Armschwingen, unter zusätzlichen kognitiven Aufgaben (Brown et al., 1999; Rankin et al., 2000; Stelmach et al., 1990). Doumas et al. (2009) stellten einen altersbezogenen Unterschied bei der Ressour-

cenallokation hinsichtlich der motorischen und kognitiven Aufgabe fest, wobei die Priorisierungen in herausfordernden Dual-Task-Situationen bei älteren Teilnehmern eher zugunsten der motorischen Aufgabe erfolgten, bei jüngeren Teilnehmern dagegen zugunsten der kognitiven Aufgabe. Auch beim Gehen als motorischer Aufgabe liegt empirische Evidenz zu einem signifikanten Einfluss des Alters auf Interferenzen bei einer zusätzlichen kognitiven Aufgabe vor. Sowohl jüngere als auch ältere Teilnehmer reduzierten im Mittel die Gehgeschwindigkeit in Dual-Task-Bedingungen, jedoch trat dieser Effekt bei älteren Teilnehmern verstärkt auf (Al-Yahya et al., 2011; Lajoie et al., 1996), insbesondere unter schwierigen motorischen Bedingungen wie dem Durchlaufen eines anspruchsvollen Parcours oder dem Steigen über Hindernisse (Lindenberger et al., 2000; Yogev-Seligmann et al., 2008). Neben der posturalen Kontrolle und dem Gehen war in weiteren Studien zu isometrischen Kontraktionen der oberen und unteren Extremitäten bei älteren Personen eine reduzierte Kraftstetigkeit unter kognitiven Belastungen zu beobachten (Mehta & Rhee, 2017; Noven et al., 2014; Pereira et al., 2015). Beziehen wir die emotionale Ebene ein, so ließ eine Studie von M. G. Carpenter et al. (2006) bei der Induktion von Angst durch das Stehen auf einer erhöhten Plattform keinen altersbezogener Unterschied erkennen. Jüngere und ältere Teilnehmer wendeten in angstauslösenden Situationen vergleichbare Strategien an und verbesserten die Steifigkeit durch reduzierte anteroposteriore Schwankwege und höhere Schwankungsfrequenzen. Somit lassen sich altersbezogene Unterschiede bei kognitiv-motorischen Aufgaben nachweisen, nicht jedoch bei einer Beeinflussung der motorischen Kontrolle durch eine Induktion von Zustandsangst über das Stehen auf einer erhöhten Plattform.

Zur Frage geschlechtsspezifischer Unterschiede der Stressreaktivität im Bereich der Haltungskontrolle und weiterer Parameter der Zielmotorik liegt kein einheitliches Bild vor. Untersuchungen zur Haltungskontrolle im Stehen und Sitzen von Hillman et al. (2004) ergaben, dass sich Frauen beim Betrachten von Bildmaterial mit negativer emotionaler Valenz nach hinten lehnten, während ein solcher Effekt bei Männern nicht zu beobachten war. Diese Ergebnisse konnten jedoch von Horslen und Carpenter (2011) sowie Stins und Beck (2007) nicht repliziert werden. Auch unter kognitiver Belastung war kein geschlechtsspezifischer Unterschied hinsichtlich der posturalen Kontrolle nachzuweisen (Hainaut et al., 2011). Im Hinblick auf die Initiierung und Ausführung einer Gehbewegung konnte für junge Erwachsene von Naugle et al. (2011) sowie Almajid und Keshner (2019) kein geschlechtsspezifischer Unterschied hinsichtlich der Stressreaktivität festgestellt werden. Während Naugle et al. den Einfluss emotionaler Stimuli untersuchten, widmeten sich Almajid und Keshner der gleichzeitigen Durchführung des *Timed-Up-and-Go-Test* sowie unterschiedlichen kognitiven Aufgaben wie

Kopfrechnen und dem Stroop-Test. Bei älteren Teilnehmern liegen zu geschlechtsspezifischen Einflüssen auf kognitiv-motorische Interferenzen beim Gehen widersprüchliche Erkenntnisse vor. Während Hollman et al. (2011) eine höhere Variabilität der Geschwindigkeit einzelner Schritte in der Dual-Task-Bedingung bei Männern nachweisen konnten, zeigte sich bei Johnson et al. (2016) eine höhere Variabilität der Gehbewegung bei Frauen. Werden neben dem Gehen weitere motorische Aufgaben einbezogen, so sind in einigen der Studien zwar allgemeine Effekte des Geschlechts nachweisbar, nur selten aber ein Interaktionseffekt von Geschlecht und aufgabenbezogenen Bedingungen. So zeigten sich bei statischer Muskelarbeit unter zusätzlicher kognitiver Belastung hinsichtlich der Kraftfluktuationen keinerlei Geschlechtsunterschiede (MacDonell & Keir, 2005; Mehta et al., 2012). Unter der Bedingung, dass bei Griffkraftaufgaben der Stressreiz in Form von Elektroschocks gesetzt wurde, zeigten sich Effekte in den Bereichen der aufgewendeten Kräfte und deren Stetigkeit dergestalt, dass zwar sowohl Männer als auch Frauen eine reduzierte Kraftstetigkeit aufwiesen, dies bei Frauen aber deutlicher ausgeprägt war (Christou et al., 2004; Noteboom, Fleshner, & Enoka, 2001). Diese Effekte waren nicht auf Unterschiede im physiologischen Arousal, gemessen mit Herzrate, Blutdruck und elektrodermalen Aktivität, zurückzuführen. In einem Studiendesign mit vergleichbarer Aufgabe, bei Verwendung von emotionalem Bildmaterial als Stressor anstelle von Elektroschocks, zeigte sich dieser geschlechtsspezifische Unterschied allerdings nicht (Noteboom, Barnholt, & Enoka, 2001). Weitere Studien zur Zielmotorik mit einem Fokus auf Hebebewegungen ergaben partiell Hinweise auf einen Einfluss des Geschlechts in Bezug auf Hüft- und Rumpfkineematik, jedoch kann aus den Daten keine Schlussfolgerung zu Unterschieden in der Stressreaktivität gezogen werden (Davis et al., 2002; Davis & Marras, 2003; Marras, Davis et al., 2000).

Neben dem Alter und Geschlecht wurden auch Persönlichkeitsvariablen als individualspezifischer Faktor untersucht. Insbesondere die Rolle von Ängstlichkeit als Persönlichkeitsmerkmal wurde in einer Vielzahl von Studien hinsichtlich ihres Einflusses auf die motorische Leistung unter Stress beleuchtet. Personen, die eine höhere Ausprägung in Bezug auf Ängstlichkeit als Persönlichkeitsmerkmal aufweisen, zeigen meist eine größere motorische Beeinträchtigung in stressvoll erlebten Situationen. Zur Erklärung dieser Befunde kann die Aufmerksamkeitskontrolltheorie (Derakshan & Eysenck, 2009; Eysenck et al., 2007; Eysenck & Derakshan, 2011) herangezogen werden. Sie wurde primär im Kontext individueller Unterschiede bei kognitiven Leistungen entwickelt und empirisch überprüft, lässt sich aber auch auf den Bereich motorischer Leistungen anwenden (Coombes et al., 2009; Janelle, 2002). Nach diesem

Modell wird die Effizienz der Informationsverarbeitung sowohl durch Ängstlichkeit als Persönlichkeitsmerkmal als auch durch Zustandsangst beeinflusst. Grundlegend wird postuliert, dass die Zustandsangst einen größeren Einfluss auf die Leistungserbringung ausübt, ergänzend aber auch berücksichtigt, dass Zustandsangst auf eine Interaktion von Ängstlichkeit als Persönlichkeitsmerkmal und der aktuellen Bewertung der Situation als Bedrohung zurückzuführen ist (Eysenck & Calvo, 1992). An der Informationsverarbeitung sind sowohl das stimulusgetriebene als auch das zielorientierte Aufmerksamkeitssystem beteiligt (Corbetta & Shulman, 2002). Höhere Ausprägungen hinsichtlich der Trait- und State-Angst führen zu einer Verschiebung des Gleichgewichts der beiden Systeme hin zu einem höheren Einfluss des stimulusgetriebenen Aufmerksamkeitssystems, mit der Folge einer stärker automatisierten Verarbeitung möglicher Bedrohungsreize. Eine daraus resultierende, ängstlichkeitsbedingte Ineffizienz der Informationsverarbeitung kann während relativ einfacher Aufgaben durch kognitive Anstrengung kompensiert werden, bei steigenden Anforderungen gelingt dies jedoch nicht mehr, so dass Leistungseinbußen auftreten. Coombes et al. (2009) konnten die Annahmen der Aufmerksamkeitskontrolltheorie beim Vergleich von niedrig und hoch ängstlichen Teilnehmern während explosiv-isometrischer Kontraktionen bestätigen, die auf das Betrachten von emotionalen und nicht-emotionalen Bildern folgten. So war bei hoch ängstlichen Teilnehmern beim Drücken eines Kraftaufnehmers mit der Hand eine verringerte Leistungseffizienz beobachtbar, insbesondere in einer schwierigeren motorischen Bedingung. Auch unter systematischer Variation der Bedingungen durch das Verabreichen von Elektroschocks mit ansteigender Intensität traten entsprechende Effekte auf. Unter der Bedingung der intensivsten Schocks konnte festgestellt werden, dass die höher ängstlichen Teilnehmer stärkere Einbußen hinsichtlich der Kraftstetigkeit bei einer Griffkraftaufgabe aufwiesen als niedrig ängstliche Teilnehmer (Noteboom, Barnholt, & Enoka, 2001).

Auch im Hinblick auf die posturale Kontrolle ist ein vergleichbarer Einfluss der Trait-Ängstlichkeit belegt. So ergab eine Studie, dass hoch ängstliche Teilnehmer insbesondere während Bedingungen, in denen es anspruchsvoller war, die posturale Kontrolle aufrechtzuerhalten, Unterschiede zu niedrig ängstlichen Teilnehmern aufwiesen (Hainaut et al., 2011; Staab et al., 2013). Vor allem das Ausblenden von visueller Information mit geschlossenen Augen führte so bei höher ängstlichen Personen zu einer intensiveren Beeinträchtigung der posturalen Kontrolle in Form einer höheren Steifigkeit, die mit geringeren Schwankungsbreiten und einer geringeren Schwankungsfläche einherging (Hainaut et al., 2011). Ein ähnlicher Effekt ist auch bei chronischen Rückenschmerzpatienten mit Unterschieden hinsichtlich schmerzbezogener Ängste zu beobachten. So zeigten chronische Rückenschmerzpatienten mit hoher

schmerzbezogener Angst geringere Haltungsschwankungen, insbesondere in sehr schwierigen kognitiven Bedingungen, als Rückenschmerzpatienten mit geringerer schmerzbezogener Angst (Shanbehzadeh et al., 2018). Eine weitere Studie mit älteren Personen ergab, dass die Induktion von Zustandsangst über das Stehen auf einer erhöhten Plattform bei höher ängstlichen Teilnehmern eine ineffiziente Steifigkeitsreaktion mit einer Erhöhung der Schwankungsfrequenz nach sich zog, ohne eine Verringerung der Schwankungsbreite. Niedrig Ängstliche dagegen wendeten eine adaptive Strategie an, in deren Rahmen sich die Schwankungsfrequenz erhöhte und gleichzeitig die Schwankungsbreite abnahm (Sturnieks et al., 2016).

Auch in Bezug auf die Variable der Depressivität liegen Erkenntnisse zum Einfluss auf die Stressreaktivität von Parametern der motorischen Kontrolle vor. Hausdorff et al. (2008) untersuchten bei älteren gesunden Teilnehmern Zusammenhänge zwischen Ausprägungen der State- und Trait-Ängstlichkeit, aber auch Depressivität einerseits und Gangparametern unter kognitiv-motorischen Dual-Task-Bedingungen andererseits. Hier korrelierten nicht nur die State- und Trait-Ängstlichkeit, sondern auch depressive Symptome mit Veränderungen von der Single- zur Dual-Task-Bedingung. Auch Doumas et al. (2012) untersuchten den Einfluss von Depressivität auf die motorische Kontrolle. Während sich bei der motorischen Single-Task-Aufgabe kein Unterschied zwischen depressiven und gesunden Teilnehmern hinsichtlich der posturalen Kontrolle ergab, zeigten erstere in der Dual-Task-Bedingung weniger Stabilität, bei gleichzeitig größerer Schwankungsfläche. Wie die Muskelaktivität, wird auch die posturale Kontrolle zusätzlich von früheren negativen und traumatischen Erfahrungen beeinflusst. So war bei Personen mit negativen Lebenserfahrungen als Reaktion auf emotionales Bildmaterial ein ausgeprägteres Freezing-Verhalten beobachtbar (Hagenaars et al., 2012).

Rückenschmerzpatienten

Wie in Kapitel 1.2.3 beschrieben, sind zwischen Rückenschmerzpatienten und gesunden Personen allgemein funktionelle Unterschiede feststellbar. So zeigen sich beispielsweise in Bezug auf die posturale Kontrolle sowohl im Sitzen als auch im Stehen tendenziell Unterschiede, insbesondere in anspruchsvollen posturalen Bedingungen wie dem Stehen auf einer Schaumstoffmatte (C. Koch & Hänsel, 2019). Studien, die Unterschiede in Bezug auf die Stressreaktivität in den Mittelpunkt stellten, variierten den Schwierigkeitsgrad der posturalen Aufgabe, teilweise auch den der kognitiven Aufgabe. Salavati et al. (2009) fanden so bei posturalen und kognitiven Aufgaben mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden vergleichbare Reaktionen bei Teilnehmern mit episodischem Rückenschmerz und gesunden Teilnehmern. Mit ansteigendem Schwierigkeitsgrad der kognitiven Aufgabe zeigten beide Teilnehmergruppen eine

Verringerung der Haltungsschwankungen und bei posturalen Aufgaben mit ansteigendem Schwierigkeitsgrad größere Haltungsschwankungen. So lassen die Ergebnisse dieser Studie nicht auf Unterschiede hinsichtlich der Stressreaktivität schließen. Eine vertiefende Untersuchung vergleichbarer Daten ergab ein ähnliches Ergebnis mit der Ausnahme, dass die Rückenschmerzpatienten mit ansteigender Schwierigkeit der kognitiven Aufgabe die Regelmäßigkeit posturaler Schwankungen deutlicher reduzierten als gesunde Teilnehmer (Mazaheri et al., 2010). Studien, die nur die Schwierigkeit der posturalen Aufgabe veränderten, weisen auf inkonsistente Ergebnisse zum Einfluss dieses Parameters hin. So untersuchten Van Daele et al. (2010) die posturale Kontrolle beim Sitzen auf einem instabilen Brett mit einer zusätzlichen kognitiven Aufgabe. Während einer einfacheren Position, mit zwei Beinen am Boden, reagierten beide Gruppen vergleichbar mit einer Erhöhung der Schwankung des Oberkörpers und des Beckens. Unter schwierigeren posturalen Bedingungen, mit nur einem Bein am Boden, waren jedoch Unterschiede zu beobachten, mit einer Reduktion der Schwankungsbreite in der Gruppe der Rückenschmerzpatienten. Möglicherweise ist dieser Effekt nach van Daele et al. auf eine erhöhte Kokontraktion der Rumpfmuskulatur bei Rückenschmerzpatienten zurückzuführen. Sherafat et al. (2014) dagegen fanden größere Haltungsschwankungen bei einer mittleren Ausprägung der Schwierigkeit einer dynamischen posturalen Aufgabe bei Rückenschmerzpatienten. Eine zusammenfassende Einschätzung zu einem differentiellen Einfluss in Abhängigkeit von der Aufgabenschwierigkeit ist aufgrund der vorliegenden Studienlage nicht abschließend möglich. .

Beim Gehen als motorischer Aufgabe ist bei Rückenschmerzpatienten allgemein meist ein verändertes Gangbild mit reduzierter Gehgeschwindigkeit und geringerer Schrittlängenvariabilität beobachtbar. In Dual-Task-Situationen mit zusätzlicher kognitiver Belastung zeigten gesunde Teilnehmer und Rückenschmerzpatienten vergleichbare Veränderungen, wie eine Reduktion der Gehgeschwindigkeit, als Reaktion auf eine zusätzliche kognitive Aufgabe. Jedoch reduzierten Rückenschmerzpatienten mittleren Alters die Variabilität der Oberkörperbewegungen in deutlicherem Ausmaß, was für eine verringerte Flexibilität der Rumpfkoordination unter kognitiver Belastung spricht (Lamoth et al., 2008). Diese Ergebnisse konnten Smith et al. (2017) auch für junge Patienten, die unter rezidivierenden Rückenschmerzen litten und zum Untersuchungszeitpunkt schmerzfrei waren, bei Umkehrbewegungen während des Gehens und gleichzeitiger kognitiver Aufgabe bestätigen.

Es liegen nur wenige Erkenntnisse zu kognitiv-motorischen Dual-Task-Aufgaben bei gesunden und Rückenschmerzpatienten vor, bei denen weitere motorische Aufgaben, anstelle der posturalen Kontrolle und des Gehens, untersucht wurden. Bloemsaat et al. (2004) konnten

bei einer Zielaufgabe, die mithilfe eines Stiftes auszuführen war, bei Patienten mit nichtspezifischen Schmerzen im Nacken und den oberen Extremitäten während der Bewegungsausführung unter einer zusätzlichen Gedächtnisaufgabe einen deutlich erhöhten Druck mit dem Stift im Vergleich zu den gesunden Studienteilnehmern beobachten.

Die Befundlage lässt sich zusammenfassend so charakterisieren, dass Rückenschmerzpatienten hinsichtlich der Stressreaktivität teilweise Unterschiede zu gesunden Teilnehmern aufweisen. Sie scheinen in kognitiv-motorischen Dual-Task-Bedingungen insbesondere unter anspruchsvollen motorischen Bedingungen diese Aufgabe zu priorisieren und die motorische Variabilität zu reduzieren. Unter einfachen motorischen Bedingungen ist ein solcher Effekt nicht beobachtbar.

3. Zusammenfassung des aktuellen Forschungsstandes

Bei der Entstehung und Aufrechterhaltung von Rückenschmerzen hat sich ein biopsychosoziales Verständnis zu auslösenden und aufrechterhaltenden Faktoren etabliert (Green et al., 2018; Pincus et al., 2013). Neben biologischen Mechanismen kommt, insbesondere bei geringen körperlichen Anforderungen, psychosozialen und individuellen Variablen ein hoher Stellenwert zu (Hollmann et al., 2001; Videman et al., 1989). Entsprechend eines Belastungs-Beanspruchungs-Ansatzes interagieren diese und neben verstärkenden Faktoren sind auch Ressourcen zu berücksichtigen (Flor & Turk, 1984; MacDonald & Evans, 2006; National Research Council (US) and Institute of Medicine (US) Panel on Musculoskeletal Disorders and the Workplace, 2001). Insbesondere bei Modellen, welche auf die Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden am Arbeitsplatz fokussieren (Bongers et al., 1993; Bongers et al., 2002; Sauter & Swanson, 1996), nehmen neuromuskuläre und biomechanischen Reaktionen auf Belastungen, die als Stressor erlebt werden, eine zentrale Rolle ein. Gilt das Forschungsinteresse dagegen der Aufrechterhaltung und Chronifizierung von Rückenschmerzen (Flor & Turk, 1984; Turk & Flor, 1984), werden muskuläre Reaktionsstereotypen auf Stress als besonders bedeutsam eingestuft. Wiederholte oder dauerhafte Stressexposition kann hier über kumulative Mikrotraumata zu einer Schädigung des muskuloskelettalen Systems und damit zu Rückenschmerzen führen (National Research Council (US) and Institute of Medicine (US) Panel on Musculoskeletal Disorders and the Workplace., 2001).

Rückenschmerzen manifestieren sich zwar meist nicht aufgrund spezifischer organischer Ursachen, wohl aber sind funktionelle Unterschiede zwischen Rückenschmerzpatienten und Gesunden feststellbar (Hodges et al., 2019; van Dieën et al., 2019). Diese Befunde sind angesichts der Studienlage allerdings sowohl auf muskulärer Ebene als auch bezogen auf weitere Bereiche der motorischen Kontrolle als deutlich inkonsistent zu bezeichnen (C. Koch & Hänsel, 2019; van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003). Dies lässt auf unterschiedliche Muster der motorischen Kontrolle bei Rückenschmerzpatienten schließen, wobei sich Subgruppen anhand einer eher lockeren beziehungsweise eher festeren motorischen Kontrolle charakterisieren lassen (Dankaerts et al., 2006b; Hemming et al., 2018; van Dieën et al., 2019). Neben diesen beiden zu beobachtenden Mustern, die sich auf muskulärer Ebene als geringere bzw. höhere allgemeine Muskelaktivierung bei Rückenschmerzpatienten manifestieren, zeigt sich auch das Phänomen einer asymmetrischen Aktivierung der paraspinalen Muskulatur. Aufgrund seiner potenziell negativen Auswirkungen durch deutlich erhöhte Belastung der spina-

len Strukturen (Marras et al., 2003) ist diese asymmetrische Muskelaktivierung als dysfunktional einzustufen (Oddsson & Luca, 2003; Renkawitz et al., 2006; van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003). Insbesondere bei Extensions- und Flexionsbewegungen des Rumpfes sind hinsichtlich solcher muskulärer Dysbalancen Unterschiede zwischen Rückenschmerzpatienten und Gesunden feststellbar (Grabiner et al., 1992; Oddsson & Luca, 2003; Renkawitz et al., 2006). Einerseits zeigen sich diese als Verhältnis der Muskelaktivierung im Mittel über eine Bedingung hinweg, andererseits in Form einer zeitlich versetzten Rekrutierung der links- und rechtsseitigen Muskulatur (Grabiner et al., 1992). Höhere muskuläre Dysbalancen könnten auf einen dysfunktionalen Versuch des Etablierens einer festeren motorischen Kontrolle zurückzuführen sein, während eine zeitlich versetzte Aktivierung der rechts- und linksseitigen Muskulatur möglicherweise ein Indiz für das Muster einer lockereren motorischen Kontrolle darstellt. Diese dysfunktionalen Muster können insbesondere dann, wenn sie durch nicht-spezifische Trigger wie psychische Stressoren ausgelöst werden, unangemessen lange bestehen bleiben und so muskuloskelettale Beschwerden auslösen und aufrechterhalten (van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003).

Zur Veränderung der Ausprägungen muskulärer Dysbalancen unter der Einwirkung von Stressoren liegen keine systematischen Erkenntnisse vor. Gleichwohl lassen sich aus Studien zur allgemeinen Muskelaktivierung, auch wenn diese die rechts- und linksseitige Aktivierung nicht miteinander in Beziehung setzten, erste Hinweise darauf ableiten, dass sich muskuläre Dysbalancen unter kurzfristig wirksamen Stressoren möglicherweise erhöhen (Davis et al., 2002; Laursen et al., 2002; Leyman et al., 2004) und hierbei Unterschiede zwischen Rückenschmerzpatienten und Gesunden erkennbar werden (Flor et al., 1985). Diese Studien berücksichtigten meist nur eine Muskelgruppe bzw. einen Bereich des Rückens. Während bei gesunden Teilnehmern vor allem der Bereich des Trapezmuskels betrachtet wurde, liegen bei Vergleichen der Muskelaktivierung zwischen Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern vereinzelt auch Ergebnisse zu deren Erhöhung in weiteren Bereichen des Rückens vor (Burns, 2006a; Flor et al., 1985; Glombiewski et al., 2008). Weder für statische körperliche Anforderungen wie Sitzen und Stehen, noch für leichte körperliche Anforderungen wie Extensionsbewegungen, liegen nach dem Kenntnisstand der Autorin Ergebnisse zum Einfluss kurzfristiger Stressoren auf den Bereich des gesamten Rückens vor.

Es kann davon ausgegangen werden, dass Veränderungen der Haltung und Bewegung einen Einfluss auf die Ausprägungen von muskulären Dysbalancen ausüben (Larivière et al., 2005). Wie beschrieben, belegen zahlreiche Studien, dass auch die posturale Kontrolle und

Bewegungsmuster von kognitiven und emotionalen Stressoren beeinflusst werden. In Abhängigkeit von der Aufgabenschwierigkeit und von individuellen Priorisierungsprozessen (Albertsen et al., 2017; Andersson et al., 2002; Shumway-Cook et al., 1997; Woollacott & Shumway-Cook, 2002) können auch hier Muster einer entweder lockereren oder festeren motorischen Kontrolle identifiziert werden, sowohl bei gesunden Teilnehmern als auch, partiell in stärkerer Ausprägung, bei Rückenschmerzpatienten. Ob und wie diese mit Mustern der muskulären Dysbalancen interagieren, gilt es noch zu überprüfen.

Bei Untersuchungen zum Einfluss von kurzfristig wirksamen Stressoren sind aufgrund der anzunehmenden Spezifität sowohl stimuluspezifische als auch individualspezifische Faktoren zu berücksichtigen. Während Studien zur Haltungskontrolle und Bewegung unter Stress systematisch kognitive und emotionale Stressoren variierten (Coombes et al., 2008; Patel et al., 2014) und teilweise auch auf ihre differentiellen Effekte hin verglichen (Stins et al., 2011), wurden bei Untersuchungen zur muskulären Stressreaktivität zwar partiell verschiedene Stressoren verwendet (Flor et al., 1985; Lundberg et al., 1994), jedoch nicht direkt miteinander verglichen. Aufgrund der Tatsache, dass sich insbesondere in Emotionszuständen mit negativer Valenz deutlich engere Muster der motorischen Kontrolle beobachten lassen als bei kognitiven Stressoren (Adkin & Carpenter, 2018), kann davon ausgegangen werden, dass sich dies auch auf muskulärer Ebene widerspiegelt.

Die beobachtbare hohe interindividuelle Variabilität bei der Reaktion auf gleichartige Stressoren wird häufig auf individuelle Variablen zurückgeführt. Da das Alter auf die allgemeine Muskelaktivierung einen Einfluss ausübt (Alkjaer et al., 2005), gilt es dies bei sich unterscheidenden Teilstichproben ebenso zu kontrollieren, wie mögliche geschlechtsbezogene Einflüsse unter Bewegung (Davis & Marras, 2003; Marras, Davis et al., 2000). Vor allem Rückenschmerzpatienten mit einer deutlich ausgeprägten Stressreaktion weisen oftmals höhere Werte in Bezug auf Ängstlichkeit und Depressivität auf (Burns, 2006a; Flor et al., 1985). Ob diese sich auch auf die Höhe der muskulären Dysbalancen auswirken, wird in dieser Arbeit untersucht. Neben dem vermuteten, die Stressreaktion verstärkenden Einfluss dieser beiden Aspekte, soll die Variable der Selbstwirksamkeit als möglicher protektiver Faktor zusätzlich berücksichtigt werden.

Die vorliegende Arbeit zielt insgesamt darauf ab, mögliche Veränderungen von muskulären Dysbalancen unter kurzfristig wirksamen kognitiven und emotionalen Stressoren über den gesamten Bereich des Rückens zu untersuchen, sowohl unter den statischen körperlichen Belastungen des Sitzens als auch unter leichten dynamischen körperlichen Belastungen. Dabei sollen die absoluten mittleren Seitenunterschiede berücksichtigt werden, aber auch Verläufe

über die Zeit und damit eine zeitlich versetzte Rekrutierung der links- und rechtsseitigen Muskulatur. Während für die absoluten Seitenunterscheide Empfehlungen zur Berechnung von Ratios vorliegen (Oddsson & Luca, 2003), gilt es einen Parameter, der die zeitlich versetzte Rekrutierung abbildet, noch zu entwickeln. Die Berücksichtigung weiterer Parameter der motorischen Kontrolle, wie der Haltung, bezieht neben neuromuskulären auch biomechanische Reaktionen auf Stress ein und erlaubt eine gesamtheitlichere Einordnung der Ergebnisse. Der hohen interindividuellen Variabilität soll auf zwei Arten begegnet werden. Zunächst werden individualspezifische Einflüsse wie Persönlichkeit, Alter und Geschlecht berücksichtigt und zudem versucht, Subgruppen im Hinblick auf Muster der motorischen Kontrolle zu identifizieren. In einem weiteren Schritt sollen die gewonnenen Erkenntnisse daraufhin überprüft werden, ob sie sich bei Gesunden und Rückenschmerzpatienten unterscheiden und ihnen in einem diagnostischen Kontext potenziell Aussagekraft zukommen könnte.

So werden im Rahmen von Studie 1 dieser Arbeit die Auswirkungen von kurzfristig wirksamen Stressoren auf die asymmetrische Muskelaktivierung im Bereich des gesamten Rückens bei gesunden Teilnehmern im Sitzen betrachtet. Zusätzlich werden Veränderungen der posturalen Kontrolle erfasst, um deren Einfluss auf muskuläre Dysbalancen zu berücksichtigen und die Stressreaktivität auf der Ebene der Muskelaktivierung und Bewegung des Oberkörpers in einen Zusammenhang zu setzen. Auf reaktionsspezifischer Ebene werden anhand einer Differenzierung der Stressoren in kognitive und emotionale reizspezifische Faktoren sowie der Einbeziehung der psychologischen Variable der Ängstlichkeit auch individualspezifische Aspekte berücksichtigt.

Studie 2 untersucht, ob sich Veränderungen der muskulären Dysbalancen unter einem kurzfristig wirksamen Stressor während einer leichten körperlichen Belastung zeigen, einschließlich der Berücksichtigung möglicher geschlechtsspezifischer Einflüsse. In Verbindung mit weiteren Parametern der motorischen Kontrolle wie der Bewegungsgeschwindigkeit und eines aus Daten der Studie 1 entwickelten Parameters, welcher Belastungswechsel von der links- zur rechtsseitigen paraspinalen Muskulatur über den Zeitverlauf hinweg abbildet, wird zusätzlich überprüft, ob sich im Abgleich mit der kognitiven Leistung Priorisierungsprozesse im Hinblick auf die kognitive oder motorische Aufgabe identifizieren lassen. Zusätzlich sollen diese Daten auf mögliche Subgruppen im Hinblick auf die motorische Kontrolle im Kontext von Stressreaktionen untersucht werden.

Im Mittelpunkt von Studie 3 steht schließlich die Fragestellung, ob und wie sich Rückenschmerzpatienten und gesunde Teilnehmer im Hinblick auf die muskulären Dysbalancen und auch deren Veränderung unter Stress unterscheiden. Divergierende Muster würden erste

Aussagen zur Anwendbarkeit dieser Parameter in Diagnostik, Prävention und Therapie zulassen. Aufgrund bereits vorliegender Befunde zum Einfluss persönlichkeitsbezogener Variablen auf die Muskelaktivierung und die motorische Kontrolle werden auf dieser Ebene Ängstlichkeit, Depressivität und Selbstwirksamkeit berücksichtigt.

II. Empirischer Teil

4. Methode: studienübergreifende Aspekte

In diesem Kapitel wird ein Überblick zu den Methoden gegeben, die in allen drei Studien angewendet wurden. Abweichungen hiervon werden in den Ausführungen zu den Methoden der einzelnen Studien dargestellt.

4.1 Versuchspersonen

An den drei Studien nahmen insgesamt 115 gesunde Erwachsene und 34 Rückenschmerzpatienten teil. Die genaue Beschreibung der Stichproben der einzelnen Experimente sind der Methodik der drei Studien zu entnehmen. Jede Versuchsperson wurde individuell getestet. Alle Teilnehmer wurden im Vorfeld der Studie gebeten, 24 Stunden vor der Untersuchung auf den Konsum von Alkohol und anderen stimulierenden Substanzen sowie vier Stunden vor Beginn der Datenerhebung auch auf den Konsum von Koffein und anstrengende körperliche Aktivität zu verzichten. Da das subkutane Fettgewebe der Teilnehmer als natürlicher Tiefpassfilter wirkt und insbesondere bei Personen mit hohem BMI dazu beiträgt, das Signal abzuschwächen (Nordander et al., 2003), wurden in der Studie nur Teilnehmer mit einem BMI für Normalgewichtige zwischen 18.5 und 25 berücksichtigt. Die Studienprotokolle wurden durch die Ethikkommission der Universität Regensburg genehmigt. Alle Teilnehmer wurden zu Beginn der Studie über den Ablauf informiert und erklärten schriftlich ihr Einverständnis. Die explizite Möglichkeit, die Datenerhebung zu jedem Zeitpunkt und ohne Angabe von Gründen abbrechen zu können, wurde von keiner Versuchsperson genutzt.

4.2 Kognitiver Stressor

In Studien verwendete Laborstressoren lassen sich allgemein in physiologische und psychologische einteilen (Kolotylova et al., 2010). Häufig verwendete Stressoren der ersten Kategorie sind Kälte- oder Lärmreize. Psychologische Stressoren werden in Abhängigkeit von der Aktivität des Teilnehmers in aktive und passive, in Abhängigkeit von der Standardisierung oder Anpassung an die Biografie des Teilnehmer in standardisiert oder individualisiert sowie nach der Ebene in kognitive, emotionale oder soziale Stressoren eingeteilt (Dickerson & Kemeny, 2004; Kemeny, 2003). Moderierende Merkmale der Stressoren sind Motivation, soziale Bewertung, Kontrollierbarkeit, Vorhersagbarkeit und Neuartigkeit (Dickerson & Kemeny,

2004). Eine Kombination unterschiedlicher Modalitäten wie das Bearbeiten kognitiver Aufgaben, unterlegt mit einem zusätzlichem akustischem Stressor wie dem eines weißen Rauschens, löst eine intensivere Aktivierung des autonomen Nervensystems und der HPA-Achse aus, als singuläre Stressoren (Kolotylova et al., 2010; Reinhardt, Schmahl, Wüst, & Bohus, 2012).

In allen drei Studien dieser Arbeit wurde der *Paced Auditory Serial Attention Test* (PASAT, Gronwall, 1977) als kognitive Aufgabe zur Stressinduktion verwendet. In der ersten Studie wurden zusätzlich zwei emotionale Stressoren eingesetzt, ein emotionsauslösender Filmclip und das Erinnern eines Emotionserlebnisses. Diese werden in Kapitel 5.1.2 genauer beschrieben. Der PASAT wurde ursprünglich als Maß der Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung entwickelt, um den individuellen Verlauf der Erholung nach Gehirnerschütterungen einschätzen zu können. Es liegen mehrere Versionen des PASAT vor. Grundaufgabe aller Versionen ist es, von einstelligen Zahlen, die nacheinander präsentiert werden, die jeweils beiden zuletzt genannten zu addieren und das Ergebnis zu nennen. Die Versionen unterscheiden sich in der Anzahl der Items, meist 61 oder 50, in der Art der Zahlenpräsentation, akustisch oder visuell, sowie dem Interstimulusintervall, 2,4 Sekunden, 2 Sekunden, 1,6 Sekunden oder 1,2 Sekunden. Aufgrund der Komplexität der Aufgabe, sowohl die Aufmerksamkeit in Bezug auf die präsentierten Zahlen aufrecht zu erhalten als auch zwischen Rechenoperationen und dem Enkodieren der nächsten Zahl zu wechseln, kann davon ausgegangen werden, dass der PASAT neben der Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung auch Anforderungen in den Bereichen der geteilten Aufmerksamkeit, der Daueraufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses abdeckt (Tombaugh, 2006).

Neben der neuropsychologischen klinischen Praxis wird dieses Verfahren häufig in der Forschung zur Stressinduktion eingesetzt. Die Wirksamkeit einer Stressinduktion durch den PASAT konnte durch signifikante physiologische Veränderungen hinsichtlich der Herzfrequenz, des Blutdrucks und der elektrodermalen Aktivität nachgewiesen werden (Mathias et al., 2004; Reinhardt et al., 2012; Starcke et al., 2016). Auch auf neuroendokriner Ebene führt die Bearbeitung des PASAT zu nachweisbaren Veränderungen der Konzentration von freiem Cortisol und Zytokinen im Speichel (Maydych et al., 2018; Reinhardt et al., 2012). Ferner löst der PASAT subjektives Stressempfinden (Tanosoto et al., 2015) sowie Gefühle von Angst und Trauer aus (Holdwick & Wingenfeld, 1999; Starcke et al., 2016).

Neben Daten zur Normierung liegen auch Studien zur Reliabilität und Validität vor. Crawford und Kollegen (1998) ermittelten Werte zur inneren Konsistenz mit einem Cronbachs Alpha von .90. Retest-Reliabilitäten für Zeiträume von 7-10 Tagen liegen im Bereich von > .90

(McCaffrey et al., 2001). Dennoch ist von einem Übungseffekt bei mehrmaligem Einsatz des PASAT bei gesunden Versuchspersonen auszugehen (Stuss et al., 1987). Sowohl Studien zu Korrelationen der einzelnen Versionen als auch korrelative Studien mit anderen Verfahren zur Messung der Aufmerksamkeit, aber der auch allgemeinen Intelligenz, zeigen Zusammenhänge bis zu $r = .59$ und weisen so auf eine ausreichende Validität des PASAT hin (Sherman et al., 1997). Die in dieser Arbeit verwendete PASAT-Version nach Gronwall und Sampson (1974) umfasst 61 Items mit einem Interstimulusintervall von zwei Sekunden, um mögliche Deckeneffekte zu vermeiden (Diehr et al., 2003). Die Zahlen wurden in deutscher Sprache akustisch über einen Lautsprecher präsentiert und die Gesamtdauer der Aufgabe betrug 2 Minuten und 30 Sekunden. In Anlehnung an den Mannheimer Multikomponenten-Stress-Test (MMST, Kolotylova et al., 2010) wurde, um Habituationseffekte zu vermeiden, zusätzlich ein konstanter akustischer Stressor verwendet und hierfür der PASAT während der gesamten Durchführung mit einem weißen Rauschen (78dB(A) - 93dB(A)) langsam ansteigender Lautstärke hinterlegt. Der Leistungsparameter aus dem PASAT wurde durch die Auswertung des Anteils korrekter Antworten zu allen Antworten in Prozent ermittelt.

4.3 Instrumente und Messungen

Elektromyographische Aktivität

Die elektromyographische Aktivität wurde über eine bipolare Ableitung mit dem Delsys Trigno™ (Delsys Inc., Boston, USA) EMG-System mit eingebautem Vorverstärker aufgezeichnet. Für die Untersuchungen wurden zwölf kabellose Oberflächenelektroden mit einem konstanten Zwischenelektrodenabstand von einem Zentimeter verwendet. Sofern notwendig, wurde der Ableitort rasiert und die Haut wurde standardmäßig mit Ethanol (70 % Alkohol) gereinigt, um den Übergangswiderstand zu reduzieren. Mit doppelseitigem Klebeband wurden die EMG Sensoren auf der Haut angebracht. Die einzelnen Signale wurden mit einer Abtastrate von 1.1 Kilohertz und einer Bandbreite von 20 bis 450 Hertz aufgezeichnet. Jeweils zwei Sensoren wurden bilateral links und rechts von der Wirbelsäule über dem Muskelbauch entlang des Muskelfaserverlaufs, in Anlehnung an die Empfehlungen von SENIAM (Hermens, 1999) sowie Criswell und Cram (2011), auf sechs Muskelpaaren im Rücken platziert. Tabelle 1 gibt, neben den Ableitorten der Muskelbereiche nach SENIAM, auch deren Funktion an (Spornitz, 2002; Zilles & Tillmann, 2010).

Tabelle 1

Übersicht zu den in dieser Arbeit berücksichtigten Muskeln mit Beschreibung der Ableitorte und funktioneller Einordnung

Muskel	Ableitort	Funktion
trapezius		bei doppelseitiger Aktivität: Extension der Halswirbelsäule, bei einseitiger Aktivität: Drehung von Kopf und Hals
trapezius pars descendens	auf der Hälfte der Linie von Acromion zum Wirbel C7 in Richtung dieser Linie	Heben der Schulter / Verschieben der Scapula nach kranial einseitige Aktivität: laterale Flexion und Rotation des Kopfes beidseitige Aktivität: Streckung des Kopfes und Nackens
trapezius pars transversa	zu 50 % zwischen dem medialen Rand des Schulterblatts und der Wirbelsäule auf Höhe des Wirbels T3 in horizontaler Richtung	Zurückziehen der Schulter / Verschieben der Scapula nach medial
trapezius pars ascendens	auf 2/3 der Linie vom Trigonum spinae bis zum 8. Brustwirbel in Richtung der Linie zwischen T8 und dem Acromion	Senken der Schulter / Drehen der Scapula nach lateral-kranial für die Elevation des Armes über die Horizontale
erector spinae		Stabilisierung und Streckung des Rumpfes, Seitwärtsneigung
erector spinae longissimus	mit einem Abstand von 2 Fingerbreiten seitlich vom Dornfortsatz von L1 in vertikaler Richtung	einseitige Aktivität: Seitwärtsneigen und Drehen der Wirbelsäule zur ipsilateralen Seite. beidseitige Aktivität: Extension, Rückwärtsneigen der Wirbelsäule; Verspannen der Wirbelsäule
erector spinae iliocostalis	ein Finger breit medial von der Linie von der Spina iliaca posterior superior zu dem tiefsten Punkt der unteren Rippe in Höhe von L2 in Richtung dieser Linie	einseitige Aktivität: Seitwärtsneigen und Drehen der Wirbelsäule zur ipsilateralen Seite beidseitige Aktivität: Rückwärtsneigen (Aufrichten / Strecken) der Wirbelsäule; Verspannen der Wirbelsäule
multifidus lumborum	auf einer Linie von der kaudalen Spitze der Spina iliaca posterior superior und dem Zwischenraum von L1 und L2 auf Höhe des L5 und an dieser Linie ausgerichtet (d. h. etwa 2 bis 3 cm von der Mittellinie)	einseitige Aktivität: Drehen der Wirbelsäule zur kontralateralen Seite und Unterstützung des Seitwärtsneigens beidseitige Aktivität: Streckung und Rückwärtsneigung des Rumpfes, Verspannen und Stabilisierung der Wirbelsäule

Die Auswahl der Ableitorte orientierte sich an dem Ziel der vorliegenden Arbeit, sowohl den oberen als auch den unteren Rückenbereich möglichst differenziert abzudecken. Wie in Kapitel 2.2 aufgezeigt, wurden bei bisherigen Studien zum Einfluss von Stress auf die Aktivierung und Rekrutierung der Muskeln, sowohl bei Gesunden als auch bei Rückenschmerzpatienten, meist nur einzelne Bereiche untersucht. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit, neben dem häufig untersuchten Trapezmuskel im Bereich oberhalb des Schulterblatts (Tpd), auch der Teil zwischen Brustwirbeln und Schultergelenk (Tpt) sowie unterhalb des Schulterblatts (Tpa) berücksichtigt. Die Betrachtung der Auswirkung von Stress auf den unteren Rücken bei statischen und dynamischen Untersuchungen bezieht meist nur einen Ableitort im Lendenwirbelbereich ein, und zwar paraspinal auf Höhe von L3, L4 oder L5. Durch insgesamt drei Ableitorte wurde der Einfluss von Stress auf Muskelaktivierung im Lumbalbereich in dieser Studie umfassender einbezogen.

Elektrodermale Aktivität

Zur Überprüfung der Effektivität der Stressinduktion wurde die elektrodermale Aktivität mit Hilfe eines ProComp Infiniti SA7500 (Thought Technology; Montreal, Canada) Analog-Digital-Umsetzers aufgezeichnet. Zwei Ag/AgCl Elektroden (SC-Flex/Pro, SA930) wurden mit je einem Klettband an der Handinnenfläche auf dem mittleren Fingerglied des Mittel- und Zeigefingers der nichtdominanten Hand angebracht. In Anlehnung an die publizierte Richtlinie zur Erfassung der elektrodermalen Aktivität (Dawson et al., 2007) wurde sichergestellt, dass an den Fingern keine sichtbaren Hautläsionen vorhanden waren. Die Haut wurde mit Wasser gereinigt und eine kleine Menge Elektrolyt-Gel in die Haut eingerieben. Die Aufzeichnung erfolgte mit einer exosomatischen Messung mit Gleichstrom und einer Spannung von 0.5 Volt zwischen den beiden Elektroden. Die Abtastrate lag bei 256 Messungen pro Sekunde und es wurde mit einer Bandbreite 0.05 Hertz bis 1 Kilohertz gemessen. Die Aufzeichnung der elektromyographischen und elektrodermalen Daten wurde synchronisiert.

Fragebogen zur Erhebung demographischer Daten und zur Anamnese

Zu Beginn der Datenerhebung füllte jeder Versuchsteilnehmer einen allgemeinen Fragebogen aus. Abgefragt wurden neben Alter, Geschlecht, Händigkeit und Beruf auch chronische und aktuelle Beeinträchtigungen der Gesundheit. Neben körperlichen, psychiatrischen und neurologischen Erkrankungen, Verletzungen, Unfällen und Erkrankungen des Stütz- und Bewegungsapparates im Allgemeinen erfolgte eine genaue Anamnese von Rückenschmerzen im Hinblick auf aktuell vorliegende und in der Vergangenheit erlebte Schmerzen. Neben der

Lokalisation, der Intensität und dem Schmerzverlauf wurden objektiv diagnostizierte organische Ursachen und subjektive Erklärungsmuster abgefragt. Zur Kontrolle möglicher Störeinflüsse auf die Messungen wurde die Schlafqualität der letzten Woche und Nacht („Wie beurteilen Sie insgesamt die Qualität Ihres Schlafes während der letzten Woche?“, „Wie beurteilen Sie insgesamt die Qualität Ihres Schlafes während der letzten Nacht?“; fünfstufige Ratingskala mit den Ausprägungen „sehr gut“, „gut“, „mittel“, „schlecht“, „sehr schlecht“), regelmäßig und aktuell eingenommene Medikamente („Haben Sie im letzten Jahr regelmäßig Medikamente eingenommen?“, „Haben Sie gestern oder heute Medikamente eingenommen?“; zweistufiges Antwortformat mit den Ausprägungen „ja“, „nein“), der Konsum von Alkohol und stimulierenden Substanzen 24 Stunden vor der Datenerhebung („Haben Sie die letzten 24 Stunden Alkohol zu sich genommen?“, „Haben Sie während der letzten 24 Stunden stimulierend oder beruhigend wirkende Medikamente, Drogen, Nahrungsergänzungsmittel oder Nahrungsmittel zu sich genommen?“; zweistufiges Antwortformat mit den Ausprägungen „ja“, „nein“) sowie der Konsum von Koffein und belastende körperliche Aktivitäten vier Stunden vor der Datenerhebung („Haben Sie die letzten vier Stunden Koffein zu sich genommen?“; zweistufiges Antwortformat mit den Ausprägungen „ja“, „nein“; „Bitte geben Sie anstrengende körperliche Betätigungen während der letzten vier Stunden an“, offenes Antwortformat) eruiert. Das erlebte Stressniveau der letzten Woche und am Tag der Messung („Wie gestresst haben Sie sich die letzte Woche gefühlt?“, „Wie gestresst fühlen Sie sich heute?“) wurde mit einer fünfstufigen Ratingskala mit den Ausprägungen „sehr stark, stark, mittel, wenig und gar nicht“ abgefragt.

State-Trait-Angst-Inventar

Das deutschsprachige State-Trait-Angstinventar STAI (Laux et al., 1981) basiert auf der amerikanischen Version von Spielberger, Gorsuch und Lushene (1970). Mit dem STAI liegt ein sowohl in der experimentellen Stress- und Angstforschung als auch im klinischen und pädagogischen Kontext eingesetztes Fragebogenverfahren (Hoyer & Margraf, 2003) zur Erfassung von aktuellen Angstzuständen (Zustandsangst, State-Angst) und habituellen Aspekten der Angst (Ängstlichkeit, Trait-Angst) vor. Diese beiden Konstrukte können unabhängig voneinander mit je einem Fragebogen, bestehend aus 20 Feststellungen zur Selbsteinschätzung mit vierstufiger Antwortskala mit den Polen 1 „überhaupt nicht“ und 4 „sehr“ erfasst werden. Nach Umkodierung der sieben negativ formulierten Items wird der Summenrohwert ermittelt, der Werte zwischen 20 und 80 annehmen kann. Zur Kontrolle von Ängstlichkeit auf die Stressreaktion wurde in dieser Arbeit der Trait-Fragebogen (STAI-T) verwendet. Hinsichtlich der Gütekriterien

kann der STAI als reliabel und valide bezeichnet werden. Neben der gegebenen Objektivität weist der Trait-Fragebogen eine hohe interne Konsistenz mit einem Cronbachs Alpha von etwa .90 und einer als ausreichend zu bewertenden Retest-Reliabilität von .77 für Männer und .90 für Frauen auf (Barnes et al., 2002). Die Eindimensionalität des Konstruktes konnte für die deutsche Version bestätigt werden (Debener, 2001). Laux et al. (1981) verweisen im Manual auf hohe konvergente Validitäten, nachgewiesen über Korrelationen mit der Skala zur Messung manifester Angst mit $r = 0.73\text{--}0.90$. Geringe Korrelationen mit Intelligenz und sozialer Erwünschtheit geben Hinweise auf eine positive divergente Validität. Einschränkend ist festzuhalten, dass die Normierung, die auf Daten aus dem Jahr 1977 (Laux et al., 1981) basiert, als veraltet angesehen werden muss. Dennoch kann der Trait-Fragebogen aufgrund seiner psychometrischen Qualität zusammenfassend als adäquates Instrument zur Einschätzung der Ängstlichkeit eingeschätzt werden.

4.4 Datenanalyse und -auswertung

Elektromyographische Aktivität

Zur Bestimmung der Höhe der Muskelaktivität wurde mithilfe eines Glättungsverfahrens aus dem ungefilterten EMG-Rohsignal Root Mean Square Werte (RMS, Wurzel aus dem Mittelwert der quadrierten Amplitudenwerte) berechnet. Einzelne zufällig fehlende Werte, die weniger als 1 % der erhobenen Daten umfassten, wurden durch Mittelwerte dieser Variable ersetzt (Enders, 2010). Die verwendeten Normierungsverfahren werden im Rahmen der jeweiligen Studien beschrieben. In einem nächsten Schritt wurden Ratios zur Bestimmung der muskulären Dysbalancen links- und rechtsseitig der Wirbelsäule für die sechs gemessenen Muskelpaare bestimmt (Oddsson & Luca, 2003; Reeves et al., 2006). Mithilfe der folgenden Gleichung kann aus dem Quotienten des Wertes der rechten Seite dividiert durch den Wert der linken Seite (ratio) für jedes Muskelpaar die absolute muskuläre Dysbalance (amD) berechnet werden.

$$amD = \begin{cases} (ratio - 1), ratio \geq 1 \\ \left(\frac{1}{ratio} - 1\right), ratio < 1 \end{cases} \quad (1)$$

Die absolute muskuläre Dysbalance erlaubt nur eine Aussage über die Höhe der Dysbalance, nicht die Richtung. Um mögliche Einflüsse der Händigkeit der Teilnehmer nicht einfließen zu lassen (Butler, Hubley-Kozey, & Kozey, 2009; Marker et al., 2016; Merletti, Luca, & Sathyan, 1994), wurden nur die absoluten muskulären Dysbalancen verwendet.

Elektrodermale Aktivität

Die Daten zur Hautleitfähigkeit wurden mit Hilfe der auf Matlab (The MathWorks, Natick, MA, USA) basierenden Toolbox LedaLab (Benedek & Kaernbach, 2010) ausgewertet. Es erfolgte eine Artefaktbereinigung durch visuelle Inspektion und die Abtastrate der Daten wurde auf eine Frequenz von 16 Hz reduziert. Anschließend wurden die Daten mittels einer Dekompositionsanalyse in tonische und phasische Komponenten zerlegt. Für jede experimentelle Bedingung wurde das mittlere Hautleitniveau (*skin conductance level*, SCL) als tonischer Parameter und die Anzahl der Spontanfluktuationen pro Minute (*non-specific skin conductance responses*, NS.SCR freq.) mit einem Amplitudenkriterium von 0.05 μS berechnet. Um interindividuelle Schwankungen zu reduzieren, wurde für den SCL mit der von Lykken und Venables (1971) vorgeschlagenen Methode eine Bereichskorrektur durchgeführt.

5. Studie 1

Ziel der ersten Studie war es, den Einfluss eines kognitiven und zweier emotionaler Stressoren auf die asymmetrische Aktivierung der paraspinalen Muskulatur und die posturale Kontrolle zu untersuchen, sowie einen möglichen Zusammenhang zwischen diesen beiden Faktoren. Durch eine zusätzliche Berücksichtigung der Variable der Ängstlichkeit sollten weitere Erkenntnisse zur beobachteten, hohen interindividuellen Variabilität in Bezug auf die Stressreaktivität generiert werden.

Kognitive und emotionale Stressoren führen bei gesunden Erwachsenen zu einer allgemeinen Erhöhung der Muskelaktivität im Rücken (Burns, 2006a; Flor et al., 1991; Krantz et al., 2004; Luijckx et al., 2014; Lundberg et al., 1994; Wijsman et al., 2013). Neben dieser allgemeinen Muskelaktivierung im Sinne einer symmetrischen Aktivierung der links- und rechtsseitigen paraspinalen Muskulatur unter Stress, wurde eine Erhöhung der asymmetrischen Muskelaktivierung unter kurzfristig wirksamen Stressoren nach Kenntnisstand der Autorin bisher noch nicht systematisch untersucht. Studien zu muskulären Stressreaktionen weisen partiell jedoch auf einseitige Erhöhungen der Muskelaktivität unter Stress hin (Ekberg et al., 1995; Laursen et al., 2002; Leyman et al., 2004).

Zur stimulusspezifischen Aktivierung der Muskulatur im gesamten Rückenbereich liegen keine systematischen Erkenntnisse bei gesunden Teilnehmern vor. Zu einer Muskelanspannung im Bereich des Trapezmuskels (Krantz et al., 2004; Lundberg et al., 1994) führen insbesondere aufmerksamkeitsbezogene Anforderungen und höheres Arousal, mit abnehmender muskulärer Aktivierung in kaudaler Richtung (Waersted & Westgaard, 1996). Emotionale Stressoren führen bei gesunden Teilnehmern und Rückenschmerzpatienten zu einer höheren allgemeinen Muskelaktivierung im Bereich des Trapezmuskels und im Lumbalbereich (Burns, 2006a). So wird erwartet, dass kognitive Stimuli im oberen Bereich des Rückens zu Erhöhungen der muskulären Dysbalancen führen, nicht jedoch im unteren Bereich des Rückens, und dass emotionale Stimuli die muskulären Dysbalancen sowohl im oberen als auch im unteren Bereich des Rückens erhöhen (**Hypothese 1**).

Neben stimulusspezifischen ist auch von individualspezifischen Anteilen der Stressreaktion auszugehen (Lacey & Lacey, 1958). Zusätzlich zu Faktoren wie Persönlichkeit, Alter, Geschlecht und erlebten Kindheitstraumata (Luijckx et al., 2016; Marras, Davis et al., 2000), spielen Lernerfahrungen (Flor et al., 1990; van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003) eine Rolle bei der

Entstehung dieser individuellen Reaktionsmuster auf muskulärer Ebene. So werden intraindividuell konsistente Reaktionsmuster über die Stressbedingungen hinweg erwartet (**Hypothese 2**).

Neben der Veränderung der Muskelaktivierung ist von einer Beeinflussung der motorischen Kontrolle, insbesondere der posturalen Kontrolle, in statischen Positionen durch kurzfristig wirksame Stressoren auszugehen. Es liegen sowohl Erkenntnisse zur Beeinflussung der posturalen Kontrolle während des Stehens und Sitzens durch zusätzliche kognitive Aufgaben (Andersson et al., 2002; Pellecchia, 2003) als auch bei der Konfrontation mit aversiven emotionalen Stimuli oder mentaler Vorstellung emotional bedeutsamer Situationen vor (Lelard et al., 2017; Stins & Beek, 2007). Während sich für schwierige kognitive Aufgaben größere Abweichungen vom Mittelpunkt in anterioposteriorer und mediolateraler Richtung zeigen (Dumas et al., 2018; Pellecchia, 2003), sollte sich bei emotionalen Stimuli ein gegensätzlicher Effekt zeigen. Emotionale visuelle Stimuli mit stark negativer Valenz gehen meist mit einer Reduktion der Schwankungsbreiten einher (Lelard et al., 2019), ebenso wie Erinnerungsaufgaben mit negativem Inhalt (Lelard et al., 2013). So lässt sich postulieren, dass es während der kognitiv anspruchsvollen Aufgabe des PASAT zu einer Erhöhung der Abweichungen vom Mittelpunkt kommt, während die emotionalen Stressoren zu einer Reduktion dieser führen (**Hypothese 3**).

Es ist davon auszugehen, dass muskuläre Dysbalancen durch Bewegung mit beeinflusst werden (Cram & Steger, 1983; Jonsson, 1970; Larivière et al., 2005). Vor diesem Hintergrund kann postuliert werden, dass Veränderungen der muskulären Dysbalancen mit Veränderungen der Bewegung des Oberkörpers einhergehen (**Hypothese 4**).

Während Ergebnisse vorliegen, dass die Stressreaktivität auf muskulärer Ebene durch die psychologische Variable der Ängstlichkeit beeinflusst wird (Fridlund et al., 1986; Hoehn-Saric et al., 1997; Willmann et al., 2012), konnte dies für die Haltungskontrolle (Hainaut et al., 2011; Stins et al., 2011; Zaback et al., 2015) in leichten posturalen Bedingungen und mit geöffneten Augen nicht eindeutig nachgewiesen werden. Ängstlichere Personen sollten so, wenn sie mit einem Stressor konfrontiert werden, eine höhere Muskelaktivierung zeigen. Die posturale Kontrolle von niedrig und höher ängstlichen Personen sollte sich dagegen nicht unterscheiden (**Hypothese 5**).

5.1 Methode

5.1.1 Stichprobe

An der Studie nahmen 34 Studierende (14 Frauen und 20 Männer) der Universität Regensburg und der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg mit einem mittleren Alter von 22.71 Jahren ($SD = 2.34$ Jahre) teil. Der mittlere Body-Mass-Index (BMI) betrug 23.19 ($SD = 3.23$). 31 der Teilnehmer waren Rechtshänder, drei Linkshänder. Um sicherzustellen, dass nur gesunde junge Erwachsene an dieser Studie teilnehmen und um weitere Einflüsse auf die psychophysiologischen Messungen zu kontrollieren, wurden folgende Ausschlusskriterien festgelegt: a) berichtete Vorgeschichte muskuloskelettaler Verletzungen oder Beschwerden; b) chronische körperliche, psychiatrische oder neurologische Erkrankungen; c) schlechte Schlafqualität in den vorangegangenen 24 Stunden, d) aktuelles Stressniveau höher als „mittel“ und d) Einnahme von Medikamenten, die die physiologische Stressantwort beeinflussen könnten. Jede Person wurde einzeln getestet.

5.1.2 Versuchsablauf und experimentelle Bedingungen

Versuchsablauf

Die Untersuchung fand in einem geräuscharmen, schwach beleuchteten Labor statt, dessen Raumtemperatur konstant auf ca. 22 °C gehalten wurde. Die Gesamtdauer betrug je Proband zweieinhalb Stunden. Zu Beginn wurden die Versuchspersonen über die Studie informiert und mit der allgemeinen Vorgehensweise bekannt gemacht. Im Anschluss unterzeichneten die Teilnehmer eine Einverständniserklärung zur Versuchsteilnahme und Datenauswertung. Bevor die Sensoren zur Messung der Muskelaktivität am Rücken und zur Messung der elektrodermalen Aktivität an der Handinnenfläche angebracht wurden, füllten die Teilnehmer den Anamnesebogen aus, wie in Kapitel 4.3 beschrieben. Danach bearbeiteten sie den Trait-Bogen des STAI (Laux et al., 1981). Als nächstes wurden die Versuchspersonen mit den Stressoren vertraut gemacht, um Neuheitseffekte während des Experiments zu reduzieren. Der kognitive Stressor wurde erklärt und mithilfe einer Beispielaufgabe eingeübt, um sicher zu stellen, dass die Teilnehmer die Aufgabe verstanden hatten. Danach unterstützte der Versuchsleiter die Teilnehmer durch standardisierte Fragen dabei, eine für sich persönlich relevante Ärgersituation der jüngeren Vergangenheit für eine der emotionalen Stressbedingungen auszuwählen. In der Folge wurden anthropometrische Daten erhoben und die Sensoren be-

festigt. Die Teilnehmer setzten sich auf einen höhenverstellbaren Bürostuhl ohne Rollen, dessen Rückenlehne und Sitzfläche festgestellt waren. Die Höhe der Sitzfläche wurde so eingestellt, dass die Knie der Teilnehmer einen 90° Winkel bildeten. Die Hände sollten flach auf den Oberschenkeln mit nach oben gedrehter Handfläche abgelegt werden. Die Teilnehmer wurden aufgefordert, bequem aufrecht zu sitzen und sowohl Bewegungen als auch ein Berühren der Rückenlehne zu vermeiden. Die Studie folgte hier den Empfehlungen von Cram, Lloyd und Cahn (1994). In einer dreiminütigen Ruhephase wurden die Teilnehmer instruiert, sich bei geöffneten Augen zu entspannen und eventuell vorhandene Muskelanspannung zu lösen. Als nächstes wurde für die Dauer von vier Minuten eine Baseline erhoben. Danach folgten in ausbalancierter und randomisierter Reihenfolge zwei emotionale sowie ein kognitiver Stressor, denen sich jeweils eine zweiminütige Rückkehr zur Baseline-Messung anschloss. Vor und nach den drei Stressoren füllten die Teilnehmer eine Skala zur Messung des emotionalen Zustands, das *Affect Grid* (Russell et al., 1989) aus. Um Ermüdungseffekte der Muskulatur zu vermeiden, wurden die Teilnehmer angehalten, sich vor jedem neuen Stressor zurückgelehnt an der Stuhllehne auszuruhen.

Stressoren

Als Stressoren wurden ein aktiver kognitiver Stressor sowie zwei passive emotionale Stressoren verwendet (Dickerson & Kemeny, 2004). Es handelte sich um die im allgemeinen Methodenteil beschriebene PASAT-Aufgabe sowie eine standardisierte emotionsauslösende Filmszene und eine personalisierte Erinnerungsaufgabe. Beide emotionale Stressoren wurden mit dem Ziel eingesetzt, die Emotion Ärger (Burns, 1997, 2006a) zu induzieren, entsprechend der Erkenntnisse von Burns, dass diese Emotion zu einer hohen muskulären Reaktivität führt.

Die Methode des Filmclips wurde gewählt, da hiermit, wie auch durch personalisierte Erinnerungsaufgaben, bei der Induktion von Ärger signifikante Veränderungen auf den beiden Dimensionen der Valenz und des Arousal nachgewiesen werden konnten (Christie & Friedman, 2004; Jallais & Gilet, 2010). Filmszenen und narrative Texte induzieren im Vergleich zu anderen Methoden der Emotionsinduktion sowohl positive als auch negative Gefühle am zuverlässigsten, gemessen anhand von subjektiven, behavioralen und physiologischen Maßen (Kreibig, 2010; Westermann et al., 1996). Ein direkter Vergleich der beiden Methoden zeigt, dass das Filmmaterial sowohl bezogen auf das Auslösen einer spezifischen Emotion, als auch auf die Intensität der Emotion, den narrativen Texten überlegen ist (Zupan & Babbage, 2017). Neben

der Effektivität der Emotionsinduktion, die sich über die Kombination von visuellen und auditiven Stimuli und einer damit einhergehenden dynamischen Nachstellung emotionaler Situationen erklären lässt, spricht der hohe Grad der Standardisierung für die Verwendung dieser Methode. In dieser Untersuchung wurde eine Szene aus dem Film „Schrei nach Freiheit“ (Originaltitel: „Cry Freedom“) verwendet. Die sowohl von Gross und Levenson (1995) als auch von Hewig und Kollegen (2005) validierte Filmszene zur Induktion von Ärger zeigt Polizisten, die eine friedliche Demonstration aufhalten und diese gewaltsam beenden. Die Dauer von zwei Minuten und 36 Sekunden ist mit der des kognitiven Stressors vergleichbar. Die Filmszene wurde auf einem 17-Zoll-Bildschirm mit einem Augenabstand von ungefähr 65 cm und auf Augenhöhe der Teilnehmer gezeigt. Der Klang des Filmclips wurde mit einer mittleren Lautstärke von 65 Dezibel präsentiert.

Als zusätzlicher emotionaler Stressor wurde eine individualisierte Erinnerungsaufgabe eingesetzt, gemäß den Studien zur Untersuchung der Auswirkungen persönlich relevanter Stressoren (Burns, 2006a; Dickson-Parnell & Zeichner, 1988; Flor et al., 1985; Glombiewski et al., 2008). Imaginationsaufgaben können als valide Methode der Emotionsinduktion betrachtet werden, wie sich auf der Grundlage involvierter Gehirnregionen aus neuropsychologischen Studien mit bildgebenden Verfahren ableiten lässt (Kober et al., 2008). Die Induktion von Ärger durch die Erinnerung einer Ärgersituation geht mit einer erhöhten sympathischen sowie präfrontal-kortikalen Aktivierung einher, was zusätzlich für die Validität dieser Methode spricht (Quigley et al., 2014; Waldstein et al., 2000). Die Teilnehmer wurden gebeten, sich die Ärgersituation, die sie vor dem Anbringen der Sensoren vorbereitet hatten, möglichst detailliert und lebhaft noch einmal gedanklich von Anfang bis Ende zu durchleben, indem Sie sich auf die emotional aufwühlenden Aspekte dieser Situation konzentrieren. Die Dauer dieses Stressors betrug 90 Sekunden, da Vorstudien ergeben hatten, dass Teilnehmer, die vergleichbar zu dieser Stichprobe waren, die Ärgersituation nicht länger als 90 Sekunden imaginieren konnten.

5.1.3 Instrumente und Messungen

Elektromyographische und elektrodermale Aktivität

Die elektromyographische und elektrodermale Aktivität wurde wie in Kapitel 4.3 beschrieben erfasst.

Bewegungserfassung

Zur Erfassung der dreidimensionalen Bewegung wurde ein opto-elektronisches Vicon-Messsystem (Vicon, Oxford, UK) mit 10 Kameras eingesetzt. Ein kugelförmiger Marker mit infrarotreflektierender Oberfläche und einem Durchmesser von 14 Millimeter wurde bei den Teilnehmern im Nackenbereich auf Höhe von C7 und vier weitere seitlich an der Sitzpfanne des Stuhls mit Klebebandstreifen befestigt. Dreidimensionale Veränderungen wurden mit einer zeitlichen Auflösung von 200 Hz aufgezeichnet. Das Motion Capture System befand sich in einem 10 m x 6 m großen Raum.

Fragebögen und Skalen

Wie beschrieben, wurden vor dem Anbringen der Sensoren der allgemeine Fragebogen zur Erhebung demographischer Daten und zur Anamnese sowie der Trait-Bogen des STAI von den Teilnehmern ausgefüllt. Vor und nach jeder Stressinduktion wurde das Affect Grid eingesetzt.

5.1.4 Datenauswertung

Muskelaktivität

Die RMS-Werte wurden aufgrund der statischen Haltung und dem damit einhergehendem geringen Risiko einer Phasenverschiebung für Zeitfenster von 0.5 Sekunden bestimmt (Freiwald et al., 2007; Konrad, 2005) und anschließend über die Dauer der experimentellen Versuchsbedingungen gemittelt. Um die ableitbedingte inter- und intraindividuelle Variabilität, beispielsweise aus der unterschiedlichen anatomischen Beschaffenheit des Unterhautgewebes der Teilnehmer resultierend, zu reduzieren und um die Werte zwischen den einzelnen Elektrodenplatzierungen und über die Versuchspersonen hinweg vergleichen zu können, wurde eine versuchsinterne Normierung vorgenommen. Das gemittelte EMG-Signal der experimentellen Bedingungen (erste zwei Minuten der Baseline-Messung, die auf die Ruhephase folgte, und drei Stressbedingungen) wurde mit dem entsprechend gemittelte Signal eines jeden EMG-Kanals während der dritten bis vierten Minute der Baseline-Messung normalisiert (Burden, 2010; National Institute for Occupational Safety and Health, 1992). Weiter wurden die Ratios der absoluten muskulären Dysbalancen, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, berechnet. Neben der Betrachtung der muskulären Dysbalancen pro Muskelpaar, wurden für weitere Berechnungen die Dysbalance-Ratios der drei oberen und der drei unteren Paare gemittelt, um je einen Wert für den oberen und den unteren Rückenbereich zu erhalten.

Bewegungserfassung

Die erhobenen Daten wurden mit einem Tiefpassfilter von 5 Hz gefiltert. Der Schwerpunkt der aufgezeichneten Punktwolke des Markers bei C7 wurde als Referenzpunkt der Bewegung definiert. Die Markertrajektorien wurden anschließend mithilfe dieses Schwerpunkts in ihre mediolateralen, anterioposterioren und vertikalen Anteile zerlegt und die mittlere Abweichung in Millimeter berechnet. Aufgrund messtechnischer Probleme konnten die Bewegungsdaten nur für 26 Teilnehmer ausgewertet werden.

Elektrodermale Aktivität

Die Auswertung erfolgte wie im übergreifenden Methodenteil in Kapitel 4.3 beschrieben.

Fragebögen

Die Fragebögen wurden entsprechend der im allgemeinen Methodenteil dargelegten Vorgehensweise ausgewertet. Die Bewertungen im Affect Grid wurden in eine neunstufige Valenz- und eine neunstufige Arousal-Skala überführt.

Statistische Auswertung

Zur Berechnung der Unterschiede von Baseline-Messung und Stressbedingung wurden für alle Vergleiche die Werte der ersten Baseline herangezogen, da sich die Werte der Baseline-Messungen nicht voneinander unterschieden. Reaktivitätswerte wurden durch das Bilden von Differenzen aus den Werten der jeweiligen Stressbedingungen und dem Wert der Baseline berechnet. Vergleich von Baseline und Stressbedingungen sowie Vergleiche der Stressreaktivität in den einzelnen Stressbedingungen wurden mithilfe von Varianzanalysen mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor „Bedingung“ (Baseline, Filmclip, PASAT, Erinnerung) berechnet. Bei Verletzungen der Sphärizitätsannahme wurden die Freiheitsgrade mit der Methode nach Greenhouse und Geisser (1959) korrigiert. Bei multiplen Mittelwertvergleichen wurde das Alphaniveau mit der Bonferroni Methode angepasst (Bland & Altman, 1995). So wurde das α -Niveau bei drei Vergleichen auf $p < 0.016$ festgelegt. Aufgrund der geringen Robustheit von parametrischen Verfahren gegenüber extremen Ausreißern (Salkind, 2010), wurde beim Vorliegen von Werten, die mehr als drei Standardabweichungen vom Mittelwert abweichen, auf nichtparametrische Verfahren zurückgegriffen. Aus diesem Grund wurde für Vergleiche der Baseline-Messung zu den Stressbedingungen für die einzelne Muskelpaare und auch zusammengefasst für den oberen bzw. den unteren Bereich des Rückens der Wilcoxon-

Vorzeichen-Rangtests verwendet. Auch bei diesem Verfahren wurde das Alphaniveau mit der Bonferroni-Methode korrigiert. Zusammenhänge zwischen einzelnen Variablen wurden mit der Produkt-Moment-Korrelation von Pearson berechnet. Auch hier wurde das Alphaniveau angepasst. Effektstärken werden bei Varianzanalysen mit Messwiederholung mit η_p^2 , bei t-Tests mit d und beim Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest mit r angegeben. Für die Interpretation von Effektstärken wurde auf Empfehlungen von Ellis (2011) und Fritz et al. (2012) zurückgegriffen.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Manipulationsüberprüfung

Die Effektivität der Stressinduktion wurde sowohl mit zwei Parametern der elektrodermalen Aktivität, der NS.SCR freq. und dem SCL, sowie durch subjektive Einschätzungen des emotionalen Befindens mit dem Affect Grid überprüft.

Elektrodermale Aktivität

Alle Stressbedingungen führten zu einem Anstieg der NS.SCR freq. im Vergleich zur Baseline-Bedingung. Am geringsten nahm der Wert während der Erinnerung zu, die meisten NS.SCR freq. zeigten sich während der PASAT-Aufgabe und eine mittlere Zunahme war während des Filmclips zu verzeichnen. Für den SCL zeigte sich auch der niedrigste Wert in der Baseline-Baseline-Bedingung und dieser stieg am deutlichsten während der PASAT-Aufgabe an, gefolgt vom Filmclip und der Erinnerung, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2

Mittelwerte, Standardabweichungen und Konfidenzintervalle für die Parameter der elektrodermalen Aktivität

Bedingung	NS.SCR freq.		SCL	
	<i>M (SD)</i>	<i>95% KI</i>	<i>M (SD)</i>	<i>95% KI</i>
Baseline	0.80 (0.73)	[0.54, 1.05]	0.17 (0.19)	[0.11, 0.24]
Filmclip	4.44 (4.63)	[2.82, 6.05]	0.63 (0.22)	[0.55, 0.71]
PASAT	5.78 (5.71)	[3.79, 7.77]	0.73 (0.22)	[0.65, 0.80]
Erinnerung	2.05 (2.02)	[1.34, 2.75]	0.61 (0.27)	[0.52, 0.71]

Anmerkung. NS.SCR freq. = Anzahl der Spontanfluktuationen; SCL=Hautleitfähigkeitsniveau; M = Mittelwert; SD = Standardabweichung; KI = Konfidenzintervall

Eine ANOVA mit Messwiederholung ergab für die NS.SCR freq. einen signifikanten Effekt des Faktors „Bedingung“, $F(2.02, 16.87) = 15.22, p < .001, \eta_p^2 = .32$. Alpha-Fehler adjustierte post-hoc Tests konnten signifikante Unterschiede von der Baseline-Bedingung zu allen drei Stressbedingungen aufzeigen: Baseline und Filmclip, $t(33) = 4.68, p < .001, d = 1.10$ (95% KI [0.61; 1.66]); Baseline zu PASAT, $t(33) = 5.02, p < .001, d = 1.22$ (95% KI [0.69; 1.75]); und Baseline zu Erinnerung und, $t(33) = 3.87, p < .001, d = 0.81$ (95% KI [0.43; 1.45]).

Auch für den SCL zeigte sich ein signifikanter Effekt des Faktors „Bedingung“ $F(3, 99) = 38.43, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.54$. Auch hier waren signifikante Unterschiede von der Baseline zu allen Stressbedingungen zu beobachten: Baseline zu Filmclip, $t(33) = 9.26, p < .001, d = 2.24$ (95% KI [1.63, 2.84]), Baseline zu PASAT-Aufgabe, $t(33) = 10.48, p < .001, d = 2.72$ (95% KI [2.06, 3.38]) und Baseline zu Erinnerung, $t(33) = 7.08, p < .001, d = 1.88$ (95%KI [1.31, 2.46]).

Neben den Vergleichen der Baseline-Messung und den Stressbedingungen wurden Unterschiede der Reaktivitäten in den drei Stressbedingungen berechnet. Die Reaktivitäten auf der Ebene der NS.SCR freq. wichen signifikant voneinander ab, $F(1.67, 55.19) = 9.26, p = .001, \eta_p^2 = .22$. Sowohl die Reaktivität der PASAT-Aufgabe ($M = 4.98, SD = 5.78, 95\% \text{ KI } [2.96, 6.99]$), unterschied sich von der Reaktivität der Erinnerung ($M = 1.25, SD = 1.88, 95\% \text{ KI } [0.59, 1.90]$), $t(33) = 4.36, p < .001, d = 0.86$ (95%KI [0.54; 1.58]), als auch der Reaktivität des Filmclip ($M = 3.64, SD = 4.53, 95\% \text{ KI } [2.05, 5.22]$) von der Erinnerung; $t(33) = 3.39, p = .002, d = 0.69$ (95% KI [0.32; 1.33]). Die Reaktivität der PASAT-Aufgabe und des Filmclips unterschieden sich

nicht, ($M_{Diff} = 1.34$, $SD = 6.08$, 95% KI [0.78, 3.46]), $t(33) = 1.29$, $p = .21$. Für die Variable SCL unterschied sich die Reaktivität in den drei Bedingungen nicht, $F(2, 66) = 2.24$, $p = .11$.

Subjektive Einschätzung

Der emotionale Zustand vor und nach jeder Stressbedingung wurde mit dem Affect Grid abgefragt. Bezüglich der Valenz zeigt eine Varianzanalyse mit Messwiederholung und den zwei Innersubjektfaktoren „Zeit“ (vor der Stressinduktion, nach der Stressinduktion) und „Bedingung“ (Filmclip, PASAT-Aufgabe, Erinnerung) signifikante Haupteffekte für den Faktor „Bedingung“, $F(2, 66) = 6.34$, $p = 0.03$, $\eta_p^2 = .16$, und den Faktor „Zeit“, $F(1, 33) = 187.75$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .85$. Außerdem ergab sich ein signifikanter Interaktionseffekt von „Bedingung*Zeit“, $F(2, 66) = 4.07$, $p = .02$, $\eta_p^2 = .11$, siehe Abbildung 2. Vor allen drei Stressinduktionen schätzten die Versuchspersonen ihren emotionalen Zustand bezogen auf die Valenz vergleichbar ein, $F(2, 99) = 2.43$, $p = .09$, nicht jedoch nach den Stressinduktionen, $F(2, 99) = 4.28$, $p = .02$, $\eta_p^2 = .08$. Der PASAT zeigte nach der Stressinduktion höhere Werte im Vergleich zum Filmclip, $t(33) = 3.57$, $p = .001$, $d = 0.87$ (95% KI [0.36, 1.37]) und auch zur Erinnerungsaufgabe, $t(33) = 2.89$, $p = .007$, $d = 0.53$ (95% KI [0.03, 1.02]). Dahingegen unterschieden sich der Filmclip und die Erinnerung nach der Stressinduktion nicht, $t(33) = 0.51$, $p = .61$.

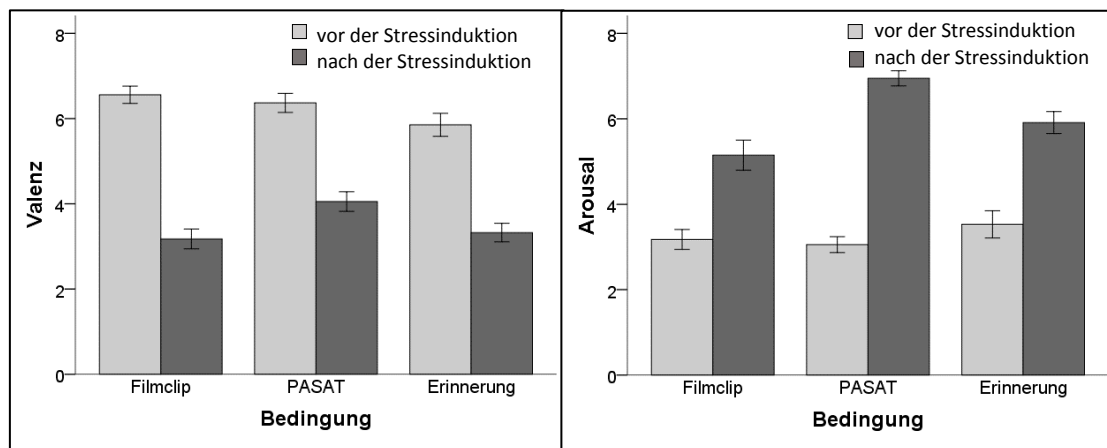
Bonferroni-korrigierte t-Tests zeigten hinsichtlich des Faktors „Zeit“ für alle drei Bedingungen signifikante Abnahmen bei den Werten der Valenz von vor der Stressinduktion zu nach der Stressinduktion: Filmclip, $t(33) = 10.90$, $p < .001$, $d = 1.87$ (95% KI [1.29, 2.45]); PASAT-Aufgabe, $t(33) = 7.91$, $p < .001$, $d = 1.36$ (95% KI [0.82, 1.90]); und Erinnerung, $t(33) = 8.21$, $p < .001$, $d = 1.40$ (95% KI [0.86, 1.94]).

Auch für die Werte des Arousal ergab sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor „Bedingung“, $F(2, 66) = 6.44$, $p = .03$, $\eta_p^2 = .16$, und den Faktor „Zeit“, $F(1, 33) = 129.58$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .80$. Auch die Interaktion von „Bedingung*Zeit“ ergab ein signifikantes Ergebnis, $F(2, 66) = 15.11$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .31$. Vor der Stressbedingung unterschieden sich der Filmclip, die Erinnerung und die PASAT-Aufgabe nicht, $F(2, 99) = 0.96$, $p = .39$. Nach der Stressinduktion zeigte sich ein Unterschied zwischen den Bedingungen, $F(2, 99) = 11.08$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .18$. Die beiden emotionalen Stressoren Filmclip und Erinnerung unterschieden sich nicht, $t(33) = 0.51$, $p = .61$, die PASAT Bedingung zeigte jedoch ein höheres Arousal im Vergleich zum Filmclip, $t(33) = 5.46$, $p < 0.001$, $d = 1.32$ (95% KI [0.79, 1.86]), und zur Erinnerungsaufgabe, $t(33) = 4.04$, $p < .001$, $d = 0.98$ (95% KI [0.47, 1.49]). Bonferroni-korrigierte t-Tests zeigten für alle drei Bedingungen signifikante Zunahmen auf der Ebene des Arousal durch die Stressinduktion:

Filmclip, $t(33) = 5.72$, $p < .001$, $d = 1.39$ (95% KI [0.85, 1.93]); PASAT-Aufgabe, $t(33) = 15.19$, $p < .001$, $d = 3.68$ (95% KI [2.89, 4.48]); und Erinnerung, $t(33) = 6.70$, $p < .001$, $d = 1.63$ (95% KI [1.07, 2.18]).

Abbildung 2

Mittlere Ausprägungen der Valenz und des Arousal vor und nach jeder Bedingung



Anmerkung. Mittelwerte gebildet aus den subjektiven Ratings auf der neunstufigen Skala des Affect Grid; Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

5.2.2 Veränderung der Muskelaktivität unter Stress

Absolute muskuläre Dysbalancen: Baseline zu Stressbedingungen

Die Unterschiede von der Baseline- zu den drei Stressbedingungen wurden hinsichtlich der absoluten muskulären Dysbalancen mit Hilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests berechnet. Aufgrund der Mehrfachvergleiche wurde das Alphaniveau angepasst. Die Mediane und Interquartilsabstände für jede Bedingung und jedes Muskelpaar können Tabelle 3 entnommen werden.

Für das Muskelpaar des Tpd ließ sich mit einer Mediandifferenz von 0.43 eine signifikante Erhöhung von der Baseline zur PASAT-Bedingung feststellen, $Z(34) = 2.44$, $p = .008$, $r = .42$. Dagegen erwiesen sich die Erhöhungen der Dysbalancen von jeweils 0.11 für die Bedingungen Filmclip, $Z(34) = 0.56$, $p = .29$, $r = .10$, und Erinnerung, $Z(34) = 1.09$, $p = .14$, $r = .19$, als nicht signifikant. Hinsichtlich der Dysbalancen für das Muskelpaar Tpt erreichten, bezogen auf die Baseline, zwei Erhöhungen Signifikanz, zur Bedingung Filmclip mit einer Mediandifferenz von 0.02, $Z(34) = 2.16$, $p = .015$, $r = .37$, sowie zum PASAT mit einer Mediandifferenz von 0.06,

$Z(34) = 3.10, p < .001, r = .53$. Knapp verfehlt wurde die Signifikanz dagegen für die Bedingung Erinnerung mit einer Mediandifferenz von 0.03, $Z(34) = 2.07, p = .019, r = .36$. Die Erhöhung der Dysbalancen beim Muskelpaar Tpa erwies sich für die Bedingung PASAT mit einer Mediandifferenz von 0.12 als signifikant, $Z(34) = 2.44, p = .007, r = .42$. Keine signifikanten Unterschiede waren dagegen zu den Bedingungen Filmclip, $Z(34) = 1.38, p = .08, r = .23$, sowie Erinnerung, $Z(34) = 0.98, p = .16, r = .53$, zu verzeichnen. Keine signifikanten Unterschiede ließen sich für das Muskelpaar Esl beim Vergleich der Dysbalancen erkennen, jeweils zwischen der Baseline und den Bedingungen Filmclip, $Z(34) = 1.72, p = .04, r = .29$, Erinnerung, $Z(34) = 0.80, p = .41, r = .14$, und PASAT, $Z(34) = 1.38, p = .08, r = .24$. Für das Muskelpaar Esi erreichen im Vergleich mit der Baseline alle erfassten Erhöhungen der Dysbalancen Signifikanz, sowohl unter der Bedingung Filmclip mit einer Mediandifferenz von 0.04, $Z(34) = 3.36, p < .001, r = .58$, als auch der Erinnerung mit einer Mediandifferenz von 0.04, $Z(34) = 3.09, p < .001, r = .53$ sowie der PASAT-Aufgabe mit einer Mediandifferenz von 0.09, $Z(34) = 3.70, p < .001, r = .63$. Eine signifikante Erhöhung der Dysbalancen ließ sich für das Muskelpaar MI beim Vergleich zwischen der Baseline und der Bedingung Filmclip erkennen (Mediandifferenz 0.03), $Z(34) = 2.47, p < .001, r = .42$. Dagegen ergab sich für die Bedingungen Erinnerung, $Z(34) = 1.91, p = .03, r = .33$, und PASAT, $Z(34) = 1.48, p = .07, r = .25$, kein signifikanter Unterschied.

Zusammenfassend waren so für den PASAT signifikante Erhöhungen in allen drei Paaren des Trapezmuskels und im Erector spinae iliocostalis zu beobachten. Der Filmclip führte zu Erhöhungen im Trapezius pars transversa, im Erector spinae iliocostalis und in den oberflächlichen Muskelfasern des Multifidus lumborum. Die Erinnerungsaufgabe bedingte nur im Muskelpaar des Erector spinae iliocostalis signifikante Veränderungen.

Zusätzlich zur Berechnung der einzelnen Muskelpaare wurde die Erhöhung der muskulären Dysbalance für den oberen und unteren Rückenbereich in gemittelter Form berechnet, wobei jeweils drei Muskelpaare zusammengefasst wurden. Die muskuläre Dysbalance für den oberen Rückenbereich im Mittel zeigte für die PASAT-Bedingung signifikante Unterschiede zur Baseline, $Z(34) = 3.12, p = .001, r = .54$. Die beiden emotionalen Stressbedingungen, Filmclip und Erinnerung, unterschieden sich dagegen nicht signifikant von der Baseline-Bedingung. Im unteren Rückenbereich führten alle drei Stressbedingungen zu signifikanten Erhöhungen zur Baseline, für die Bedingung Filmclip mit einer Mediandifferenz von 0.07, $Z(34) = 3.09, p = .001, r = .53$, für die Erinnerungsaufgabe mit einer Mediandifferenz von 0.09, $Z(34) = 2.37, p = .008, r = .41$, und auch für den PASAT mit einer Mediandifferenz von 0.10, $Z(34) = 2.81, p = .002, r = .48$.

Tabelle 3

Ausprägungen der absoluten muskulären Dysbalance (Median und Interquartilsabstand)

Muskelpaar	Baseline	Filmclip	PASAT	Erinnerung
	<i>Mdn (IQR)</i>	<i>Mdn (IQR)</i>	<i>Mdn (IQR)</i>	<i>Mdn (IQR)</i>
Tpd	0.09 (0.50)	0.20 (0.71)	0.52 (1.40)	0.21 (0.49)
Tpt	0.02 (0.10)	0.04 (0.13)	0.08 (0.17)	0.05 (0.11)
Tpa	0.05 (0.09)	0.05 (0.13)	0.17 (0.27)	0.09 (0.18)
Esl	0.05 (0.03)	0.08 (0.27)	0.10 (0.18)	0.07 (0.18)
Esi	0.02 (0.03)	0.06 (0.10)	0.11 (0.22)	0.06 (0.12)
MI	0.04 (0.07)	0.07 (0.26)	0.08 (0.24)	0.08 (0.24)
Oberer Rücken	0.08 (0.27)	0.14 (0.24)	0.29 (0.54)	0.16 (0.27)
Unterer Rücken	0.04 (0.15)	0.11 (0.22)	0.15 (0.23)	0.14 (0.15)

Anmerkung. Tpd = Trapezius pars descendens; Tpt = Trapezius pars transversa; Tpa = Trapezius pars ascendens; Esl = Erector spinae longissimus; Esi = Erector spinae iliocostalis; MI = Multifidus lumborum; Md = Median; IQR = Interquartilsabstand

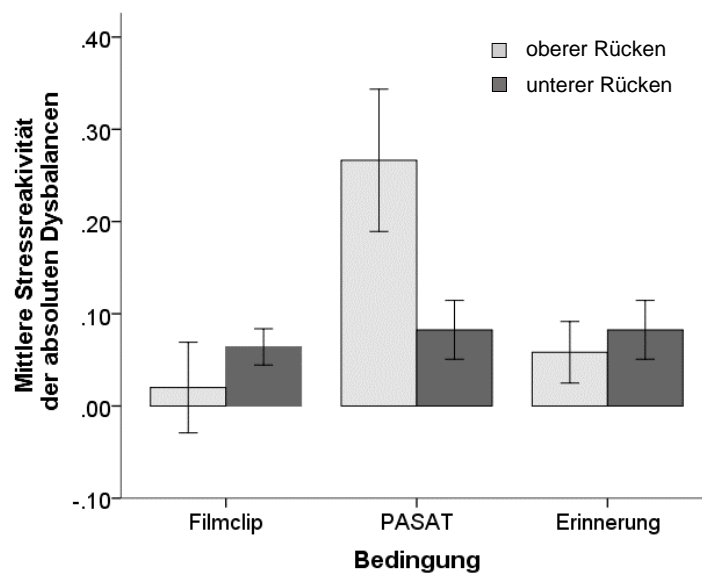
Stressreaktivität der muskulären Dysbalancen

Eine ANOVA mit Messwiederholung mit den beiden Faktoren „Bedingung“ und „Lokalisation“ als Innersubjektfaktoren und den Reaktivitätswerten der muskulären Dysbalancen für den oberen und unteren Rücken als abhängige Variablen ergab einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Bedingung“ $F(2, 66) = 8.43, p = .01, \eta_p^2 = .20$, nicht für den Faktor „Lokalisation“, $F(1, 33) = 0.28, p = 0.60$. Die Interaktion aus den beiden Faktoren „Bedingung*Lokalisation“ wurde signifikant, $F(2, 66) = 4.36, p = .02, \eta_p^2 = .12$, siehe Abbildung 3. Der Haupteffekt Bedingung zeigte sich darin, dass die Teilnehmer während der PASAT-Aufgabe ($M = 0.17, SD = 0.25, 95\% \text{ KI } [0.09, 0.26]$) eine höhere Stressreaktivität auf muskulärer Ebene aufwiesen als während des Filmclips ($M = 0.04, SD = 0.17, 95\% \text{ KI } [-.01, .09]$), $t(33) = 3.00, p = .005, d = 0.73$ ($95\% \text{ KI } [0.23, 1.23]$), und auch als während der Erinnerung ($M = 0.06, SD = 0.13, 95\% \text{ KI } [.01, 0.11]$), $t(33) = 3.57, p = .001, d = 0.87$ ($95\% \text{ KI } [0.36, 1.37]$). Bezüglich der Interaktion „Bedingung*Lokalisation“ zeigte sich, dass im unteren Rücken die Reaktivitätswerte von Filmclip

($M = 0.06$, $SD = 0.11$, 95% KI [0.03, 0.10]), PASAT-Aufgabe ($M = 0.08$, $SD = 0.19$, 95% KI [0.02, 0.14]) und Erinnerung ($M = 0.06$, $SD = 0.17$, 95% KI [0.01, 0.12]) vergleichbar waren, $F(2, 66) = 0.36$, $p = .70$. Im oberen Rückenbereich war jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen feststellbar, $F(1.34, 1.95) = 7.30$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .18$. Bonferroni-korrigierte t-Tests zeigten Unterschiede von der PASAT-Aufgabe zum Filmclip, $t(33) = 2.90$, $p = .007$, $d = 0.70$ (95% KI [0.21, 1.20]), und auch zur Erinnerung, $t(33) = 3.03$, $p = .005$, $d = 0.73$ (95% KI [0.23, 1.23]). Die beiden emotionalen Stressoren unterschieden sich nicht, $t(33) = 0.97$, $p = .34$.

Abbildung 3

Absolute muskuläre Stressreaktivität in Bezug auf die statischen muskulären Dysbalancen



Anmerkung. Stressreaktivität berechnet aus der Differenz der Mittelwerte der Stressbedingung und der Baseline-Bedingung; Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Konsistenz der Stressreaktivität der muskulären Dysbalancen

Zur Überprüfung der Konsistenz der Stressreaktionen wurden Produkt-Moment-Korrelationen nach Pearson der Stressreaktivitäten des oberen und unteren Rückens aller Stressbedingungen berechnet. Die Reaktivität der absoluten muskulären Dysbalancen des unteren Rückens korrelierte über alle drei Bedingungen hinweg signifikant. Die Reaktivität des oberen Rückens wies signifikante Zusammenhänge für die beiden emotionalen Stressoren auf, nicht jedoch für die PASAT-Aufgabe mit den beiden emotionalen Stressoren. Es zeigten sich auch

keine Zusammenhänge zwischen den Reaktivitäten des oberen und unteren Rückenbereichs in den einzelnen Bedingungen, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4

Korrelationen der Stressreaktivitäten der absoluten muskulären Dysbalancen

	1	2	3	4	5	6
1. Filmclip oberer Rücken	—					
2. Filmclip unterer Rücken	-.08 [-.33, .24]	—				
3. PASAT oberer Rücken	.15 [-.21, .53]	.01 [-.35, .41]	—			
4. PASAT unterer Rücken	.30 [-.10, .57]	.46* [.17, .67]	.10 [-.36, .44]	—		
5. Erinnerung oberer Rücken	.60* [.22, .83]	-.08 [-.45, .31]	.27 [-.06, .63]	.18 [-.26, .49]	—	
6. Erinnerung unterer Rücken	.17 [-.15, .52]	.51* [.10, .79]	.15 [-.39, .59]	.67* [.34, .87]	.01 [-.38, .42]	—

Anmerkung. Korrelationskoeffizienten nach Pearson mit Konfidenzintervallen in eckigen Klammern;
* = signifikantes Ergebnis auf mit der Bonferroni-Methode korrigiertem Alphaniveau von $p < .003$

5.2.3 Veränderung der posturalen Kontrolle unter Stress

Im Folgenden werden alle Abweichungen vom Mittelpunkt in Millimeter angegeben.

Veränderung Baseline zu Stressbedingungen

Varianzanalysen mit Messwiederholung und den vier Bedingungen als Innersubjekt-faktoren ergaben für die drei Bewegungsrichtungen signifikante Unterschiede in mediolateral, $F(2.21, 57.46) = 4.86$, $p = .009$, $\eta_p^2 = .16$, in anterioposteriorer, $F(2.30, 59.88) = 6.37$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .20$, und auch in vertikaler Richtung, $F(1.71, 44.94) = 5.94$, $p = .007$, $\eta_p^2 = .19$.

Mediolateral zeigte die PASAT-Bedingung die größte ($M = 13.82$, $SD = 9.26$, 95% KI [10.40, 17.49]) und die Baseline-Bedingung die geringste Abweichung vom Mittelpunkt ($M = 6.86$, $SD = 5.23$, 95% KI [5.06, 9.01]). Signifikante Erhöhungen waren von der Baseline zur PASAT-Aufgabe, $t(26) = 3.74$, $p < .001$, $d = 1.04$ (95% KI [0.44, 1.63]) und von der Baseline zur

Erinnerungsaufgabe, $t(26) = 3.65$, $p = .001$, $d = 1.01$ (95% KI [0.42, 1.60]) feststellbar, nicht jedoch von der Baseline zum Filmclip, $t(26) = 2.24$, $p = .03$. Für die Bewegung in anteriorposteriorer Richtung zeigte sich auch beim PASAT der höchste Wert ($M = 14.58$, $SD = 10.03$, 95% KI [10.92, 18.40]) und die geringste mittlere Abweichung vom Mittelpunkt bei der Baseline ($M = 7.09$, $SD = 4.49$, 95% KI [5.50, 8.85]). Signifikante Veränderungen ergaben sich von der Baseline zur PASAT-Aufgabe, $t(26) = 3.79$, $p = .001$, $d = 1.05$ (95% KI [0.46, 1.65]). Weder während des Filmclips, $t(26) = 1.79$, $p = .09$, noch in der Erinnerungsbedingung, $t(26) = 1.26$, $p = .21$, gab es signifikante Zunahmen im Vergleich zur Baseline. In vertikaler Richtung war insgesamt die geringste Bewegung feststellbar. Signifikante Veränderungen zur Baseline ergaben sich nur für die PASAT-Aufgabe mit einer mittleren Zunahme um 2.65 ($SD = 3.07$, 95% KI [0.96, 4.33]), $t(26) = 4.48$, $p < .001$, $d = 1.24$ (95% KI [0.63, 1.85]). So waren für die PASAT-Aufgabe in allen drei Bewegungsrichtungen signifikante Veränderungen von der Baseline aus zu beobachten, für den Filmclip in keiner und für die Erinnerungsaufgabe in mediolateraler Bewegungsrichtung.

Vergleich der Reaktivität der posturalen Kontrolle

Die PASAT-Aufgabe zeigte in allen drei Bewegungsrichtungen die größte Stressreaktivität bezogen auf die Abweichung vom Mittelpunkt. Der Filmclip und die Erinnerung wiesen mediolateral eine vergleichbare Abweichung auf, anteriorposterior und vertikal trat in der Filmclipbedingung eine größere Abweichung auf als in der Erinnerungsaufgabe, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5

Stressreaktivitäten der Bewegungsamplitude (Mittelwerte, Standardabweichung und Konfidenzintervalle)

Richtung	Filmclip		PASAT		Erinnerung	
	<i>M</i> (<i>SD</i>)	<i>95% KI</i>	<i>M</i> (<i>SD</i>)	<i>95% KI</i>	<i>M</i> (<i>SD</i>)	<i>95% KI</i>
medio-lateral	3.87 (8.97)	[0.67, 7.14]	6.96 (9.67)	[3.34, 10.74]	3.85 (5.48)	[2.02, 5.91]
anterior-posterior	3.02 (8.77)	[-0.08, 6.83]	7.50 (10.29)	[3.94, 11.24]	1.29 (5.32)	[-0.65, 3.34]
vertikal	2.50 (4.68)	[1.02, 4.53]	2.65 (3.07)	[1.53, 3.92]	0.62 (1.87)	[-0.08, 1.33]

Anmerkung: M = Mittelwert; SD = Standardabweichung; KI = Konfidenzintervall

Eine 3 x 3 ANOVA mit Messwiederholung mit den drei Stressbedingungen und den drei Bewegungsrichtungen als Innersubjektfaktoren sowie der mittleren Veränderung der Bewegung von Bedingung zu Baseline als abhängiger Variable ergab einen signifikanten Haupteffekt für „Bedingung“, $F(2, 52) = 3.91$, $p = .03$, $\eta_p^2 = .13$, und für „Bewegungsrichtung“, $F(2, 52) = 3.92$, $p = .03$, $\eta_p^2 = .13$, die Interaktion aus „Bedingung*Bewegungsrichtung“ wurde nicht signifikant, $F(4, 104) = 2.13$, $p = .08$.

Bonferroni-korrigierte post-hoc Tests ergaben für die drei Bedingungen einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der PASAT-Aufgabe ($M = 5.70$, $SD = 6.40$, 95% KI [3.41, 8.18]) und der Erinnerung ($M = 1.92$, $SD = 2.97$, 95% KI [0.92, 3.12]), $t(26) = 2.62$, $p = .015$, $d = 0.73$ (95% KI [0.15, 1.30]), nicht zwischen den beiden emotionalen Stressoren, $t(26) = 0.88$, $p = .39$, und auch nicht zwischen PASAT und Filmclip, $t(26) = 1.96$, $p = .06$.

Für die Bewegungsrichtung zeigte sich post hoc ein signifikanter Unterschied zwischen der mediolateralen ($M = 4.89$, $SD = 5.53$, 95% KI [2.91, 7.13]) und der vertikalen Richtung ($M = 1.92$, $SD = 2.18$, 95% KI [1.14, 2.83]), $t(26) = 2.98$, $p = .006$, $d = 0.83$ (95% KI [0.25, 1.41]). Die Unterschiede zwischen der mediolateralen und anterioposterioren Richtung wurden nicht signifikant, $t(26) = 0.75$, $p = .46$, ebenso wenig zwischen der vertikalen und anterioposterioren Richtung, $t(26) = 2.14$, $p = .04$.

Zusammenhang muskuläre Dysbalance und posturale Kontrolle

Produkt-Moment-Korrelationen der Reaktivität der Bewegungsrichtungen mit den Veränderungen der muskulären Dysbalancen im oberen und unteren Rückenbereich ergaben für die Filmclip-Bedingung und die Erinnerung keine signifikanten Zusammenhänge, weder im oberen noch im unteren Rücken, für alle $p > .05$. Während der PASAT-Aufgabe zeigten sich signifikante Zusammenhänge im oberen Rückenbereich mit allen drei Bewegungsrichtungen, in mediolateraler Richtung, $r(27) = .52$, $p = .006$, 95% KI [-0.06, 0.80], in anterioposteriö rer Richtung, $r(27) = .41$, $p = .03$, 95% KI [-0.01, 0.70] und in vertikaler Richtung, $r(27) = .47$, $p = .01$, 95% KI [-0.02, 0.73]. Für den unteren Rücken waren dagegen in der PASAT-Aufgabe keine Zusammenhänge von Bewegung und muskulärer Dysbalance zu beobachten, $p > .05$ für alle drei Bewegungsrichtungen.

5.2.4 Zusammenhang von Ängstlichkeit und Stressreaktivität

Trait-Ängstlichkeit und Reaktivität der muskulären Dysbalancen

Die Gruppe wurde bezogen auf die muskuläre Reaktivität im oberen und unteren Rückenbereich durch einen Median-Split in *Low-Responder* und *High-Responder* eingeteilt. Anschließend durchgeführte t-Tests ergaben keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Variable der Ängstlichkeit, alle $p > .05$.

Trait-Ängstlichkeit und Reaktivität der posturalen Kontrolle

Auch die Reaktivität der Bewegung wurde für jede Richtung und jede Bedingung in Low-Responder sowie High-Responder eingeteilt und auch hier erfolgte ein Gruppenvergleich hinsichtlich der Variable Ängstlichkeit. Für den Filmclip ergaben sich in medialateraler, anterioposteriorer und vertikaler Richtung keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die psychologische Variable Ängstlichkeit (alle $p > .05$). Während der PASAT-Aufgabe unterschieden sich die Low- und High-Responder in einer Bewegungsrichtung, nämlich in mediolateraler, in Bezug auf die Ängstlichkeit. So zeigten die Low-Responder ($M = 38.62$, $SD = 8.67$, 95% KI [33.48, 43.86]) signifikant höhere Ängstlichkeitswerte als die High-Responder ($M = 33.67$, $SD = 6.18$, 95% KI [30.85, 33.37]), $t(32) = 1.94$, $p = .013$, $d = 0.66$ (95% KI [0.05, 1.42]). Bei der Erinnerungsaufgabe ergab sich in anterioposteriorer Richtung ein Unterschied zwischen Low-Respondern ($M = 40.21$, $SD = 7.58$, 95% KI [35.84, 44.59]) und High-Respondern ($M = 32.30$, $SD = 5.64$, 95% KI [29.66, 34.94]), $t(32) = 3.50$, $p = .001$, $d = 1.18$ (95% KI [0.45, 1.99]). Die beiden weiteren Bewegungsrichtungen zeigten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Ängstlichkeit.

5.3 Diskussion

In der ersten Studie sollten systematische Erkenntnisse zum Einfluss von kurzfristig wirksamen Stressoren auf absolute muskuläre Dysbalancen und die posturale Kontrolle gewonnen werden. Hauptergebnis der Studie ist, dass muskuläre Dysbalancen sowohl unter dem Einfluss des kognitiven als auch der beiden emotionalen Stressoren in mehreren Muskelpaaren über den gesamten Rückenbereich zunahmen. Der kognitive Stressor erhöhte die muskulären Dysbalancen im oberen und unteren, der emotionale Stressor nur im unteren Rückenbereich, hier jedoch teilweise stärker als der kognitive Stressor. Dieser Befund spricht für einen differentiellen Einfluss der beiden Stressoren und stützt teilweise **Hypothese 1**. Es traten, außer für die PASAT-Aufgabe im oberen Rücken, deutlich konsistente Reaktionsmuster auf, was

Hypothese 2 größtenteils untermauert. Ebenso veränderte sich unter Stress die posturale Kontrolle, mit dem deutlichsten Effekt während der PASAT-Aufgabe und in mediolateraler Richtung. Dieser Effekt war nicht während des Filmclips und nur teilweise während der Erinnerungsaufgabe zu beobachten. Dies entspricht hinsichtlich des kognitiven Stressors **Hypothese 3**, nicht jedoch hinsichtlich der emotionalen Stressoren. Lineare Zusammenhänge zwischen Bewegung und absoluten muskulären Dysbalancen waren nur während des kognitiven Stressors im oberen Rückenbereich festzustellen, nicht im unteren Rücken und auch nicht während der emotionalen Stressoren. Dies bestätigt **Hypothese 4** nicht. High- und Low-Responder in Bezug auf muskuläre Dysbalancen unterschieden sich nicht hinsichtlich der Ängstlichkeit. Teilnehmer mit hoher versus niedriger Reagibilität auf der Ebene der posturalen Kontrolle während der PASAT-Aufgabe und auch während der persönlich relevanten Erinnerungsaufgabe zeigten Unterschiede hinsichtlich ihrer Ausprägungen im Bereich der Ängstlichkeit. Dies äußerte sich in einer geringeren Bewegungsamplitude bei ängstlicheren Personen, was **Hypothese 5** nicht stützt.

Manipulationsüberprüfung

Sowohl auf der Ebene der objektiven Parameter, gemessen mit der elektrodermalen Aktivität, als auch auf subjektiver Ebene, gemessen mit dem Affect Grid, ist von einer effektiven Induktion einer Stressreaktion und auch differentiellen Effekten auszugehen. Beide Parameter der elektrodermalen Aktivität zeigten in allen Stressbedingungen höhere Werte als während der Baseline-Bedingung. Während sich auf der Ebene des SCL keine Unterschiede hinsichtlich der Stressreaktivität der einzelnen Bedingungen zeigten, führten sowohl die PASAT-Aufgabe als auch der Filmclip zu einer höheren Stressreaktivität hinsichtlich der NS.SCR freq. als die Erinnerungsaufgabe. Auf subjektiver Ebene schätzten die Teilnehmer die Veränderungen während des kognitiven und der beiden emotionalen Stressoren unterschiedlich ein. Nach der PASAT-Aufgabe waren höhere Arousal-Werte im Vergleich zu den emotionalen Stressoren feststellbar und letztere zogen eine niedrigere Ausprägung der Valenz nach sich.

Muskuläre Dysbalancen

Im Vergleich zu den beiden emotionalen Stressoren waren bei der PASAT-Aufgabe im oberen Rückenbereich höhere absolute Dysbalancen und auch eine höhere Stressreaktivität auf muskulärer Ebene zu beobachten. Dabei ergaben sich für alle drei im oberen Rückenbereich erhobenen Muskelpaare Zunahmen im Vergleich zur Baseline, mit dem deutlichsten Effekt im Trapezius pars descendens. Im unteren Rücken war insgesamt kein Unterschied der

Reaktivitätswerte zwischen den Stressoren feststellbar, jedoch eine signifikante Zunahme für alle drei Stressoren im Vergleich zur Baseline. Eine Betrachtung auf der Ebene der einzelnen Muskelpaare zeigte im unteren Rücken für den Bereich des Erector spinae iliocostalis Zunahmen von der Baseline zu den drei Stressbedingungen, hingegen für die oberflächlichen Anteile des Multifidus lumborum nur für den emotionalen Stressor Filmclip. Die Effektstärken der Zunahmen sind durchgängig als mittel bis groß einzustufen.

Die in dieser Studie festgestellte asymmetrische Zunahme der Muskelaktivierung weist Konsistenz zu Studien auf, bei denen durch kognitive Stressoren eine Erhöhung der allgemeinen Muskelaktivierung im Trapezmuskel hervorgerufen wurde (Krantz et al., 2004; Lundberg et al., 1994; Wijsman, 2014). Darüber hinaus trat auch eine Erhöhung der absoluten muskulären Dysbalancen im unteren Rücken während des kognitiven Stressors auf, was den Ergebnissen von Waersted und Westgaard (1996) nicht entspricht, die eine Abnahme der Muskelaktivierung unter Stress in kaudaler Richtung postulieren. Die Unterschiede zu den Ergebnissen dieser Studie sind möglicherweise darauf zurückzuführen, dass Waersted und Westgaard (1996) die Muskelaktivierung zwar mit unterschiedlichen Bedingungen und Lokalisationen gemessen haben, jedoch nicht alle Lokalisationen unter allen Bedingungen. So waren bei der Messung der Muskelaktivität am Trapezmuskel 59 Teilnehmer einbezogen, im Bereich des Erector spinae auf Höhe L3 hingegen nur acht Teilnehmer, weshalb die Aktivierung des Trapezmuskels und des Erector spinae nur bedingt vergleichbar sind. Für die beiden emotionalen Stressoren waren nur im unteren Rücken Zunahmen von der Baseline zur Stressbedingung und eine vergleichbare Reaktivität zum kognitiven Stressor beobachtbar. Auch Burns (2006a) fand während eines ärgerinduzierenden Interviews Erhöhungen der allgemeinen Muskelaktivierung im Bereich L2-L4, jedoch im Unterschied zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie auch im Bereich des Trapezmuskels bei gesunden Teilnehmern.

Die Ergebnisse sprechen für einen zusätzlichen Einfluss des allgemeinen Arousals neben neuromuskulären Prozessen auf die Aktivierung im Bereich des Trapezmuskels, entsprechend der Erkenntnisse von Wixted und O'Sullivan (2018), die einen moderierenden Effekt der Aktivierung des SAM in Bezug auf einen Zusammenhang zwischen Aufgaben mit unterschiedlichen Aufmerksamkeitsanforderungen und der Aktivierung des Trapezmuskels feststellten. Dies könnte die Erhöhung im Bereich des Trapezmuskels in der Studie von Burns (2006a) im Vergleich zu den Ergebnissen dieser Studie erklären. Es ist davon auszugehen, dass die soziale Interaktionssituation des Interviews ein höheres Arousal auslöste als die beiden in dieser Stu-

die verwendeten passiven emotionalen Stressoren. Auch der Unterschied in der asymmetrischen Aktivierung des Trapezmuskels während der PASAT-Aufgabe im Gegensatz zu den beiden emotionalen Stressoren spricht für diese These. Die PASAT-Bedingung zeigte sowohl subjektiv mit dem Affect Grid, als auch im Vergleich zur Erinnerungsaufgabe objektiv mit der NS.SCR freq. gemessen, ein höheres Arousal. Die Reagibilität des Trapezmuskels in Bezug auf Arousal kann einerseits über die Zusammensetzung der Muskelfasern der Trapezmuskulatur erklärt werden. In diesem Muskel sind insbesondere Typ I Muskelfasern vorzufinden (Lindman et al., 1991). Nach Lundberg et (2002) sprechen diese früh auf psychische und physische Anforderungen an. Andererseits ist eine Erklärung der hohen Ansprechbarkeit dieses Muskels über seine Innervation durch die *Formatio reticularis* möglich, die eine bedeutsame Rolle bei der allgemeinen Aktivierung spielt (Jones, 2003; Marker et al., 2017).

Zusätzlich könnten die Unterschiede in der Muskelaktivierung durch den aktiven und die beiden passiven Stressoren im oberen Rücken durch eine Veränderung der Haltung beeinflusst sein. So fanden Maki und McIlroy (1996), dass eine Kopfrechenaufgabe, welche Aufmerksamkeit erforderte und zu einem erhöhten Arousal führte, eine Veränderung der Haltung im Oberkörper bedingte, im Gegensatz zu einer Aufgabe, bei der nur eine Aufmerksamkeitsleistung zu erbringen war, ohne dass sich die Aktivierung erhöhte. Auch dies könnte die erhöhte muskuläre Dysbalance im Trapezmuskelbereich erklären, insbesondere da während der PASAT-Aufgabe die muskulären Dysbalancen mit der Bewegung, gemessen anhand der Abweichung vom Mittelpunkt, korrelierte.

Die geringen Erhöhungen im oberen Rücken durch die emotionalen Stressoren sollten auch vor dem Hintergrund eingeordnet werden, dass die Teilnehmer in der Baseline-Bedingung bereits vergleichsweise hohe muskuläre Dysbalancen in der Trapezmuskulatur aufwiesen. Dies kann über eine Anspannung erklärt werden, die aus der Erwartungshaltung dem Experiment gegenüber resultierte. Die durchgeführten Maßnahmen, wie eine Instruktion zur Entspannung der Muskulatur in der Ruhephase vor dem Experiment, erwiesen sich diesbezüglich offenbar nicht als ausreichend. Somit sind die Ergebnisse im Bereich des Trapezmuskels unter Berücksichtigung des Gesetzes des Ausgangswertes (Oken, 1968) zu interpretieren, das davon ausgeht, dass die physiologische Reaktion auf einen Reiz umso geringer ausfällt, je höher der Ausgangswert ist. Bei niedrigeren Ausgangswerten hätten die durch die emotionalen Stressoren bedingten Zunahmen durchaus zu signifikanten Ergebnissen im Bereich des Trapezius pars descendens führen können.

Bezüglich der Stressreaktivität auf Ebene der muskulären Dysbalance waren im unteren Rückenbereich mit hohen Korrelationen deutlich konsistente Muster für alle drei Stressoren belegbar. Im oberen Rücken zeigten sich Übereinstimmungen für die beiden emotionalen Stressoren, für die PASAT-Aufgabe jedoch ein abweichendes Muster. Die Muskelaktivierung im oberen Rücken während der PASAT-Aufgabe muss vor dem Hintergrund der größeren Abweichung vom Mittelpunkt in Bezug auf die Bewegung sowie der bestehenden Korrelation zwischen diesen beiden Variablen eingeordnet werden. So könnten bei dieser Aufgabe die Ausprägungen der absoluten Dysbalancen durch eine bewegungsbedingte Muskelaktivierung überdeckt sein. Diese grundlegend konsistente individualspezifische Reaktion kann bei den Personen, die in allen Bedingungen hohe Stressreaktivitäten hinsichtlich der muskulären Dysbalancen aufweisen, als eventueller Risikofaktor für Entwicklung von Rückenbeschwerden eingeordnet werden. Hier lässt sich auf Turk und Flor (1984) verweisen, die im Rahmen ihres Psychobiologischen Modells chronischer Schmerzsyndrome der Skelettmuskulatur als eine Voraussetzung für eine Hyperaktivität der Rückenmuskulatur die Existenz von muskulären Antwortstereotypen anführen, welche aus genetischer Disposition, Verletzungen oder frühen Lernerfahrungen resultieren.

Bewegung

Die PASAT-Aufgabe führte zu größeren Abweichungen vom Mittelpunkt im Vergleich zur Baseline, in Bezug auf alle drei Bewegungsrichtungen. Dieses Ergebnis deckt sich mit Studien, die längere CoP-Trajektorien unter schwierigen kognitiven Aufgaben nachweisen konnten (Doumas et al., 2018; Pellecchia, 2003). Bei den beiden emotionalen Stressoren trat bei der Erinnerungsaufgabe, nicht jedoch beim Filmclip, eine Erhöhung der Abweichung in mediolateraler Richtung auf und somit war in den beiden emotionalen Bedingungen die postulierte Freezing-Antwort im Vergleich zur Baseline-Bedingung nicht zu beobachten. Möglicherweise zeigte sich beim Filmclip dieser Effekt aufgrund der methodischen Vorgehensweise nicht. Die Instruktion zu Beginn der Datenerhebung, sich möglichst ruhig zu verhalten, hat eventuell zu reduzierten Schwankungsbreiten in der Baseline geführt und damit eine Freezing-Antwort im Vergleich zur Baseline nicht beobachtbar werden lassen. Die erhöhten Schwankungsbreiten in mediolateraler Richtung bei der Erinnerungsaufgabe sind nicht konsistent mit den Ergebnissen von Lelard et al. (2013), die bei der mentalen Imagination von schmerzauslösenden Situationen eine Reduktion der Schwankungsbreiten und bei der Imagi-

nation von neutralen Bildern keine Veränderung beobachten konnten. Eine von diesen Ergebnissen abweichende Erhöhung der Schwankungsbreiten bei der Imagination einer Ärgersituation in unserer Studie könnte auf begleitende kognitive Prozesse zurückzuführen sein. In Abhängigkeit von der individuellen Imaginationsfähigkeit beansprucht das Herstellen und Aufrechterhalten einer Imagination komplexe, hierarchisch strukturierte kognitive Prozesse (Pearson et al., 2013). Sollte dies in unserer Studie zutreffen, wäre die hier beobachtete Erhöhung der Schwankungsbreiten in vergleichbarer Weise einzuordnen, wie erhöhte Schwankungsbreiten bei einer anspruchsvollen kognitiven Aufgabe.

Insgesamt war eine deutliche interindividuelle Variabilität der Stressreaktivitäten beobachtbar. Wo Signifikanz erreicht wurde, handelte es sich im Mittel um Zunahmen, bei einigen Teilnehmern jedoch um Abnahmen, was sich sowohl in den 95% Konfidenzintervallen als auch den geringen Effektstärken niederschlug. Dies könnte auf unterschiedliche Strategien der Versuchsteilnehmer im Umgang mit den Stressoren hinweisen. Erhöhungen der Schwankungsbreite werden in der Literatur zum einen als Einbußen bei der motorischen Kontrolle betrachtet, im Sinn einer Interferenz hinsichtlich limitierter Ressourcen (Shumway-Cook et al., 1997), zum anderen aber auch als Enabler-Funktion beziehungsweise als Aufgabenpriorisierung für das Bearbeiten der zusätzlichen Anforderung interpretiert (Dault et al., 2003; Lacour et al., 2008; Stoffregen et al., 1999). Eine Verringerung der Schwankungsbreite kann hingegen auf eine bessere motorische Kontrolle oder geringere Interferenz hinweisen, aber auch als adaptiver Prozess im Hinblick auf eine Erhöhung der Steifheit eingeordnet werden, um die Balance unter Stress zu unterstützen (Mitra & Fraizer, 2004). Diese kann beispielsweise durch eine verstärkte Kokontraktion der Muskulatur erfolgen (Dault et al., 2001) und würde so insgesamt für eine Priorisierung der motorischen Aufgabe sprechen. Eine weitere mögliche Erklärung dieser Befunde einer hohen interindividuellen Variabilität könnte in Unterschieden der individuellen emotionalen Zustände der Teilnehmer liegen.

Ängstlichkeit

Hinsichtlich der asymmetrischen Muskelaktivierung waren bei High- und Low-Respondern keine Unterschiede bezogen auf Ängstlichkeit festzustellen. Es wurde erwartet, dass High-Responder höhere Ängstlichkeitswerte aufweisen. Bisherige Studien zum Zusammenhang der allgemeinen Reaktivität der Muskelaktivierung und der Ängstlichkeit fanden Muster höherer Muskelaktivierung bei ängstlichen Rückenschmerzpatienten (Flor et al., 1985; Lewis

et al., 2012). Eine Erklärung für den in dieser Studie nicht zu beobachtenden Einfluss der Ängstlichkeit auf die Stressreaktivität hinsichtlich der muskulären Dysbalancen könnte sein, dass diese psychologische Variable erst im Verlauf der Chronifizierung der Rückenschmerzen eine Rolle spielt (Arntz et al., 1994; Hasenbring et al., 2014; Linton, 2000) und somit bei gesunden Teilnehmern hinsichtlich der Stressreaktivität nicht zum Tragen kommt. Als weitere Erklärung kommt in Frage, dass muskuläre Dysbalancen zwar Reaktionsstereotypen unter Stress darstellen, nicht jedoch die allgemeine Muskelaktivierung repräsentieren. Somit würde sich ein Einfluss der Ängstlichkeit auf die allgemeine Muskelaktivierung in unseren Daten nicht widerspiegeln. Ängstlichere Teilnehmer zeigten während der PASAT-Aufgabe eine geringere Bewegungsamplitude in mediolateraler Richtung sowie während der Erinnerung einer persönlich relevanten Ärgersituation eine geringere Amplitude in anterioposteriorer Richtung. Nach Staab et al. (2013) beeinflusst die individuelle Ausprägung der Trait-Ängstlichkeit, welche Strategie der posturalen Kontrolle gewählt wird. Ängstlichere tendieren hier eher zu einer Strategie der engeren Kontrolle der Haltung, im Gegensatz zu einer entspannteren Kontrolle bei den weniger Ängstlichen. Darüber hinaus können die Ergebnisse auch entsprechend der Aufmerksamkeitskontrolltheorie (Eysenck & Derakshan, 2011) eingeordnet werden. So kann es unter leichten posturalen Bedingungen durch eine Kompensation bzw. Überkompensation der ineffizienten Informationsverarbeitung von höher ängstlichen Personen zu einer verbesserten motorischen Kontrolle, einhergehend mit den gezeigten reduzierten Schwankungsbreiten, kommen. Dieses Muster scheint sich nicht nur bei gesunden Teilnehmern zu zeigen. Auch bei hochängstlichen Rückenschmerzpatienten ist eine, in diesem Kontext möglicherweise kurzfristig als Schutzfunktion im Sinne einer höheren Stabilisierung der Wirbelsäule zu interpretierende, geringere Schwankungsbreite während einer Stroop-Aufgabe zu beobachten (Shanbehzadeh et al., 2018). Aufgrund der Tatsache, dass ängstliche Personen in unterschiedlichen Situationen mit höherer Zustandsangst reagieren, kann es sein, dass sich dieses Muster häufig bzw. länger anhaltend zeigt und damit seinen adaptiven Charakter, beispielsweise aufgrund einer geringeren Bewegungsvariabilität, verliert (van Dieën et al., 2019).

In Anbetracht der Tatsache, dass die psychologische Variable der Ängstlichkeit nur Einfluss auf die posturale Kontrolle ausübt und nicht auf die Ausprägung der muskulären Dysbalancen, kann von zwei unabhängigen, sich nicht gegenseitig beeinflussenden Prozessen ausgegangen werden. Dies wird auch durch die geringen Korrelationen der Stressreaktivitäten der Bewegungsamplituden mit den Reaktivitätswerten der absoluten muskulären Dysbalancen ge-

stützt. Eine Ausnahme stellt die Aktivierung der Trapezmuskulatur während der PASAT-Aufgabe dar. Im unteren Rückenbereich lassen sich die Dysbalancen dagegen nicht auf eine Veränderung der Bewegung zurückführen. Larivière et al. (2000) untersuchten muskuläre Dysbalancen während einer Flexion-Extension und kontrollierten dabei kinematische Variablen. Auch sie kamen zu der Schlussfolgerung, dass Unterschiede in der Kinematik die muskulären Dysbalancen nicht erklären können. Diese auch in der vorliegenden Studie gefundene, relative Unabhängigkeit der Veränderung der muskulären Dysbalancen von der Bewegung unter Stress könnte ein Hinweis auf unterschiedliche Mechanismen der Stabilisierung der Wirbelsäule unter kurzfristig wirksamem Stress darstellen.

Klinische Relevanz

Die klinische Relevanz dieser Veränderungen muskulärer Dysbalancen ist zum aktuellen Zeitpunkt noch als unklar einzustufen. Jedoch lässt sich aus einer Verdoppelung der muskulären Dysbalancen für einige Bedingungen und Muskelpaare gegenüber der Baseline ableiten, dass hieraus unter der Bedingung längerfristig wirksamer Stressoren, im Sinne einer kumulativen Belastung durch wiederholte Aussetzung, bedeutsame Auswirkungen auf die spinalen Strukturen resultieren können, die mit einer Überschreitung von internen Gewebstoleranzen einhergehen (Marras, 2000; National Academies Press (US), 2001; National Research Council (US) and Institute of Medicine (US) Panel on Musculoskeletal Disorders and the Workplace, 2001).

In relativen Werten ausgedrückt, gehen einige Autoren von einer relevanten Dysbalance ab Rechts-Links-Unterschieden von 10 % (Kannus, 1994) beziehungsweise 30 % (Renkawitz et al., 2006) aus, wobei diese Postulate auf einer Einteilung basieren, die sich ursprünglich auf Unterschiede der Muskelkraft bezog. Renkawitz et al. (2006) zeigten, dass Rückenschmerzpatienten und Gesunde über dieses Kriterium bei einer Flexions- und Extensions-Bewegung unterschieden werden konnten. In der Folge eines Trainingsprogramms reduzierten sich diese Dysbalancen deutlich, ebenso wie das Schmerzerleben. In der vorliegenden Studie waren unter Stressbedingungen Unterschiede von 10 % für einige Muskelpaare feststellbar, und auch von 20 bis 30 % für wenige Muskelpaare.

Insbesondere der Bereich des Multifidus lumborum wird in seiner Funktion für die segmentale Stabilisation als bedeutsam bei der Entstehung und Chronifizierung bei Rückenschmerzen eingeschätzt (Freeman et al., 2010; Hides et al., 2008). Die im Rahmen unserer Studie festgestellte Erhöhung der Dysbalancen in diesem Bereich durch einen emotionalen

Stressor erscheint zusätzlich als bedeutsam, da psychosoziale Stressoren, die oftmals emotionale Komponenten aufweisen, aufgrund von individuellen dysfunktionalen Coping-Strategien und damit einhergehenden fehlenden Möglichkeiten der inneren Distanzierung, über die akute Stresssituation hinaus längerfristig wirksam sind (Glynn et al., 2002; Melin & Lundberg, 1997; Mierswa & Kellmann, 2017; Sjogaard et al., 2000). In diesem Zusammenhang kann auf Befunde von Flor et al. (1985) verwiesen werden, denen zufolge nach Exposition eines emotionalen Stressors bei Rückenschmerzpatienten die linksseitige Muskelanspannung in diesem Bereich zeitlich länger anhaltend messbar war. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich aus der Studienlage zahlreiche Hinweise auf die klinische Relevanz muskulärer Dysbalancen ergeben. Mit welcher Intensität diese sich auf die spinalen Strukturen auswirken und bei der Entstehung von Rückenbeschwerden zum Tragen kommen, haben numerische Simulationen der Wirbelsäulenbelastungen und prospektive Studien indes noch aufzuklären.

Den deutlichsten Einfluss auf die posturale Kontrolle übte die PASAT-Aufgabe aus. Da in dieser Bedingung bei einer Reihe von Teilnehmern Bewegungen beobachtbar waren, könnten die hierbei gemessenen hohen muskulären Dysbalancen zumindest teilweise auf Bewegung zurückzuführen sein. Die beiden emotionalen Stressoren übten dagegen nur einen sehr geringen Einfluss auf die Haltungskontrolle aus, so dass kaum Bewegungen feststellbar waren. Die höheren muskulären Dysbalancen in diesen Situationen im unteren Rücken sind somit eindeutiger auf den erlebten Stress zurückzuführen. Insbesondere während ruhigen Sitzens kann davon ausgegangen werden, dass emotionale Stressoren zu dysfunktionalen asymmetrischen Mustern der Muskelaktivierung führen. Der Einfluss von Ängstlichkeit auf die Ausprägung der Haltungsschwankungen könnte auf eine Manifestation von zwei unterschiedlichen Mustern der motorischen Kontrolle hinweisen. Dies ließe sich im Sinn einer individualisierten Prävention berücksichtigen.

Methodische Diskussion

EMG Messungen können durch mehrere Variablen deutlich konfundiert sein (Luca, 1997). Einige dieser Faktoren, wie die Dicke der subkutanen Fettschicht und das Alter, wurden in dieser Studie über eine Kontrolle des BMI und ein vergleichbares Alter berücksichtigt. Zur Kontrolle weiterer interindividueller Unterschiede erfolgt in der Regel eine Normalisierung der EMG Daten durch eine willkürliche Maximalkontraktion (MVC, maximum voluntary contraction) (Burden, 2010). Jedoch ist diese Messung der Maximalkontraktion abhängig von motiva-

tionalen Faktoren seitens der Teilnehmer, womit eine deutliche Erhöhung des Messfehleranteils einhergehen kann (Peacock et al., 1981). Da die Veränderungen der muskulären Aktivierung durch Stress erwartungsgemäß gering ausfallen, würde dieser Messfehler die Ergebnisse deutlich beeinflussen. Deshalb wurde in dieser Studie die Methode der versuchsinternen Normalisierung gewählt. Diese Art der Normalisierung lässt gültige Schlüsse auf die Veränderung der Muskelaktivierung unter Stress zu, die Vergleichbarkeit zu anderen Studien ist jedoch als eingeschränkt einzuordnen. Dem von Renkawitz et al. (2006) eindeutig nachgewiesenen Effekt der Händigkeit auf die muskulären Dysbalancen wurde über die Berücksichtigung der absoluten Ausprägungen der Dysbalancen Rechnung getragen. Weitere Faktoren, wie beispielsweise der Trainingszustand der Muskulatur (Larivière et al., 2005), wurden über die Normalisierung sowie das Berücksichtigen der Veränderungen zur Baseline bzw. der Stressreaktivität berücksichtigt.

Insgesamt wiesen die erhobenen Daten eine hohe interindividuelle Variabilität auf. Dies ist konsistent zu anderen Studien, bei denen die Stressreaktivität auf muskulärer Ebene einbezogen wurde (DeGood et al., 1994; Krantz et al., 2004). Neben einer individualspezifischen Stressantwort könnten hier auch motivationsspezifische Aspekte eine Rolle spielen (Marwitz & Stemmler, 1998). Situationen, die Verhaltensspielräume eröffnen, wie der Filmclip und die Erinnerung, sind hierfür besonders anfällig. Bezogen auf die Bedingung Erinnerung ist zusätzlich kritisch anzumerken, dass die Effekte der Stressinduktion von der individuellen Fähigkeit zur Imagination abhängen (Ji et al., 2016). Dieser Zusammenhang ist auch bei der Interpretation der vorliegenden Befunde zu berücksichtigen und könnte zu den in der Erinnerungsaufgabe, im Gegensatz zu den beiden anderen Stressoren, geringeren Stressreaktivitäten geführt haben. Insgesamt aber zeigte sich die Stressinduktion, validiert über die elektrodermale Aktivität und subjektive Einschätzungen, als erfolgreich.

Zusammenfassung

Das Ziel der ersten Studie dieser Arbeit war es, die Veränderungen der muskulären Dysbalancen unter Stress systematisch bei gesunden Teilnehmern für den ganzen Bereich des Rückens zu untersuchen. Darüber hinaus wurden Veränderungen der posturalen Kontrolle berücksichtigt, um mögliche Interaktionen aus der muskulären Aktivierung und einer Veränderung der Bewegung unter Stress zu berücksichtigen. Als individueller Faktor wurde die Ängstlichkeit auf ihren Zusammenhang mit der muskulären Reaktivität und der posturalen Kontrolle hin untersucht. Es konnte nachgewiesen werden, dass kognitive und emotionale Stressoren

unabhängig von der Bewegung zu einer Erhöhung der muskulären Dysbalancen im Rücken führten. Dieses Muster zeigte sich deutlich konsistent im Sinn einer individualspezifischen Reaktion, insbesondere im Bereich des unteren Rückens. Der individualspezifische Faktor der Ängstlichkeit führte nicht zu sich unterscheidenden Stressreaktivitäten auf der Ebene der muskulären Dysbalancen, sehr wohl aber auf der Ebene der Haltungskontrolle. Ängstlichere Teilnehmer zeigten eine geringere Bewegung des Oberkörpers und damit eine engere motorische Kontrolle. Ob und inwiefern das Zusammenwirken von muskulären Dysbalancen, Mustern der posturalen Kontrolle und Ängstlichkeit einen Risikofaktor für Rückenbeschwerden darstellt, haben zukünftige Studien zu zeigen.

6. Studie 2

Während bei der ersten Studie die systematische Untersuchung der asymmetrischen Muskelaktivierung unter dem Einfluss unterschiedlicher Stressoren bei sehr geringer körperlicher Anforderung im Mittelpunkt stand, wurden in der zweiten Studie die Auswirkungen eines kognitiven Stressors während einer einfachen motorischen Aufgabe und damit einer höheren physikalischen Anforderung untersucht. Basierend auf Erkenntnissen, dass unter dynamischen Belastungen bei Frauen und Männern Unterschiede in der Muskelaktivierung im Rücken auftreten, wurde zudem das Geschlecht berücksichtigt.

Aktuell liegen keine systematischen Untersuchungen zur Veränderung muskulärer Dysbalancen unter dem Einfluss von kurzfristig wirksamen Stressoren unter leichter physikalischer Belastung vor. Für Hebeaufgaben unterschiedlichen Schwierigkeitsgrades stellten Marras und Kollegen (2000) fest, dass sich die Muskelaktivierung im unteren Rücken unter psychosozialen Stress erhöht, operationalisiert als unterstützendes oder nicht-unterstützendes Versuchsleiterverhalten. In Abhängigkeit von kognitiven Anforderungen zeigte sich, neben einer allgemeinen Erhöhung der Muskelaktivität rechts- und linksseitig der Wirbelsäule, auch eine stärker einseitig akzentuierte Aktivierung (Davis et al., 2002; Marras, Davis et al., 2000; Nimbar et al., 2012). In einer Studie von Oddson und De Luca (2003) war eine Tendenz zu geringeren muskulären Dysbalancen im unteren Rücken bei intensiverer körperlicher Belastung beobachtbar. Somit wird davon ausgegangen, dass sich die muskulären Dysbalancen in einer motorisch-kognitiven Dual-Task-Aufgabe im Vergleich zur körperlichen Single-Task-Aufgabe im gesamten Bereich des Rückens erhöhen und diese im oberen Rücken stärker ausgeprägt sind als im unteren Rücken (**Hypothese 1**).

Unter statischen Belastungen hat, unter der Bedingung kurzfristig wirksamer kognitiver Stressoren, das Geschlecht keinen Einfluss auf die muskuläre Stressreaktivität (Krantz et al., 2004). Jedoch treten während kognitiv-motorischer Dual-Task-Aufgaben geschlechtsspezifische Reaktionen auf (Davis & Marras, 2003; Marras, Davis et al., 2000). Die Ergebnisse dieser Studien weisen darauf hin, dass Frauen in einigen Muskelgruppen des Rumpfes mit einer höheren Muskelaktivierung unter Stress reagieren. Somit wird davon ausgegangen, dass Frauen auch in Hinblick auf muskuläre Dysbalancen eine höhere Aktivierung zeigen (**Hypothese 2**).

Aufbauend auf Erkenntnissen aus der ersten Studie zum Einfluss des kognitiven Stressors auf die posturale Kontrolle, in der Form, dass insbesondere mehr Bewegung in mediola-

teraler Richtung feststellbar war, wurde ein Parameter entwickelt, der dies auch auf muskulärer Ebene widerspiegelt. Dieser Parameter basiert auf der Beobachtung von kurzfristigen Belastungswechseln in der Muskelaktivität eines Muskelpaares von der einen Seite der Wirbelsäule zur anderen Seite (Grabiner et al., 1992). Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Belastungswechsel in der Dual-Task-Bedingung häufiger zeigen als in der körperlichen Single-Task-Bedingung (**Hypothese 3**).

Für die Validierung des verwendeten Parameters der dynamischen Dysbalancen wurde dieser zur Überprüfung der Übereinstimmung, sowohl mit den statischen muskulären Dysbalancen pro Muskelpaar, als auch für den Bereich des oberen und unteren Rückens, gemittelt in Zusammenhang gesetzt. Sowohl Studien zu Veränderungen der posturalen Kontrolle unter kognitivem Stress und statischen Belastungen (Arnrich et al., 2010) als auch Erkenntnisse zur Veränderung der Muskelaktivität bei Rückenschmerzpatienten unter dynamischen Belastungen (van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003) legen nahe, dass sich in Beanspruchungssituationen unterschiedliche Reaktionspräferenzen im Sinn von mehr Stabilität bzw. Instabilität oder einer eher lockeren beziehungsweise festen Kontrolle auf motorischer Ebene zeigen. Es wird davon ausgegangen, dass der Parameter der dynamischen Dysbalancen und die absoluten statischen Dysbalancen zwei unterschiedliche Formen der motorischen Kontrolle im Hinblick auf die Stabilisierung der Wirbelsäule darstellen. Somit wird für die Zusammenhänge von statischen und dynamischen Dysbalancen Folgendes erwartet: Um als eigenständiger Parameter gelten zu können, sollten die Höhe der absoluten statischen muskulären Dysbalancen und die Auftretenshäufigkeit der dynamischen muskulären Dysbalancen auf der Ebene der einzelnen Muskelpaare keinen Zusammenhang zeigen. Zusammengefasst für den oberen und unteren Rückenbereich wird jedoch erwartet, dass die Teilnehmer als Reaktion auf den kognitiven Stressor entweder mit einer Zunahme der dynamischen Dysbalancen oder mit einer Erhöhung der statischen Dysbalancen reagieren (**Hypothese 4**).

Psychische Anforderungen können sowohl die Muskelaktivität als auch die Bewegungsausführung beeinflussen und dadurch zur Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden beitragen (Bongers et al., 2002). So wird in dieser Studie neben der Beanspruchung auf muskulärer Ebene auch eine Veränderung der Bewegung berücksichtigt. In kognitiv-motorischen Dual-Task-Aufgaben zeigt sich die motorische Interferenz häufig in einer Verlangsamung der Bewegung im Vergleich zu Single-Task-Aufgaben. Dieser Effekt tritt sowohl beim Gehen als motorischer Aufgabe (Al-Yahya et al., 2011; Patel et al., 2014) als auch bei Präzisionsaufgaben

auf (Birch et al., 2000). So wird hier die Vermutung formuliert, dass sich die Bewegungsgeschwindigkeit in der Dual-Task-Bedingung im Vergleich zur physikalischen Single-Task-Bedingung verlangsamt (**Hypothese 5**).

Bei der Durchführung einfacher motorischer und schwieriger kognitiver Aufgaben kommt es zu Dual-Task-Kosten in beiden Bereichen und damit einer gegenseitigen Interferenz (Yogev-Seligmann et al., 2008). Somit wird davon ausgegangen, dass die kognitive Leistung, neben der erwarteten Erhöhung der muskulären Dysbalancen und einer Verlangsamung der Bewegung in der Dual-Task-Bedingung, geringer ist als in der Single-Task-Bedingung. Zur Überprüfung möglicher Priorisierungsprozesse hinsichtlich der kognitiven und motorischen Aufgabe werden die Veränderungen von der Single- zur Dual-Task-Bedingung außerdem in Zusammenhang gesetzt und erwartet, dass aufgrund der postulierten Priorisierungsprozesse eine negative Korrelation zwischen diesen Veränderungen feststellbar ist (**Hypothese 6**).

Ein weiteres Ziel dieser Studie ist es, mögliche Subgruppen zu identifizieren, die sich hinsichtlich ihrer motorischen Kontrolle im oberen und unteren Rücken unterscheiden. Sowohl die hohe interindividuelle Variabilität der Muskelaktivierung bei Gesunden unter Stress (Ekberg et al., 1995; Krantz et al., 2004), als auch die Ergebnisse zu unterschiedlichen Strategien der Muskelaktivierung von Rückenschmerzpatienten in körperlichen Beanspruchungssituationen (van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003) sprechen für Subgruppen. Es wird davon ausgegangen, dass sich hinsichtlich der statischen Dysbalancen Gruppierungen finden lassen, die sich auch in Hinblick auf die dynamischen Dysbalancen unterscheiden. Eine zusätzliche Berücksichtigung der Bewegungsgeschwindigkeit und der kognitiven Leistung verspricht zusätzliche Erkenntnisse zu unterschiedlichen Strategien der motorischen Kontrolle (**Hypothese 7**).

6.1 Methode

6.1.1 Stichprobe

Insgesamt nahmen 45 Studierende der Ostbayerischen Technischen Hochschule und der Universität Regensburg im Alter zwischen 19 und 26 Jahren an der Untersuchung teil. Die Rekrutierung der Teilnehmer erfolgte über Direktansprache in Vorlesungen. Ausschlusskriterien für eine Teilnahme an der Untersuchung waren: a) berichtete Vorgeschichte muskuloskelettaler Verletzungen oder Beschwerden; b) chronische körperliche, psychiatrische oder neurologische Erkrankungen; c) schlechte Schlafqualität in den vorangegangenen 24 Stunden; d) ak-

tuelles Stressniveau höher als „mittel“ und d) Einnahme von Medikamenten, die die physiologische Stressantwort beeinflussen könnten. Jede Person wurde einzeln getestet. Aufgrund technischer Probleme konnten nur 39 Personen (25 Männer und 14 Frauen) ausgewertet werden. Das mittlere Alter dieser Gruppe betrug 22.64 Jahre ($SD = 2.26$) und der mittlere BMI 23.33 ($SD = 3.08$). Alle Teilnehmer waren Rechtshänder.

6.1.2 Versuchsaufbau

Ungefähr eine Woche vor dem Untersuchungstermin fand eine Vorinformation zu den Zielen der Studie und eine Demonstration des Versuchsaufbaus sowie der allgemeinen Vorgehensweise statt, um den Neuheitseffekt bei der Datenerhebung zu reduzieren. Die Untersuchung fand in einem geräuscharmen Labor statt, mit einer Gesamtdauer von zwei Stunden je Proband. Zu Beginn unterzeichneten die Teilnehmer eine Einverständniserklärung und füllten den Anamnesebogen wie in Kapitel 4.3 beschrieben aus. Danach wurden die anthropometrischen Daten zu Größe und Gewicht erhoben und die Sensoren zur Messung der Muskelaktivität am Rücken angebracht. Die Versuchspersonen wurden im Anschluss daran mit dem kognitiven Stressor vertraut gemacht und konnten die Aufgabe üben, bis sie in der Lage waren, sicher sechs Items in Folge zu lösen. Da die PASAT-Aufgabe in dieser Untersuchung zweimal zu bearbeiten war, sollten mit dieser Vorgehensweise die Lerneffekte reduziert werden, die normalerweise zwischen der ersten und zweiten Durchführung auftreten (Tombaugh, 2006). Danach wurden für jeden der gemessenen Muskeln maximale willkürliche isometrische Muskelkontraktionen durchgeführt, um diese später für die Normalisierung der Daten zu verwenden. Die Teilnehmer wurden angeleitet, innerhalb von fünf Sekunden die Kraft bis zum Maximum zu steigern und dann für den gleichen Zeitraum auf gleichem Niveau zu halten. Nach einer Pause von 60 Sekunden erfolgte ein zweiter Zyklus. Die MVC-Messungen für den Tpd, Tpt und Tpa erfolgten gemäß den Empfehlung von Criswell und Cram (2011) und Konrad (2005). Für die Muskelpaare des unteren Rückenbereichs wurde ein Dynamometer (CON-TREX® MJ, Physiomed Elektromedizin AG, Deutschland) mit einem Rückenadapter (Contrex CON-TREX® TP 500) verwendet. Dafür wurden die Teilnehmer, im Rückenadapter stehend, mithilfe von Stützen unterhalb und oberhalb der Knie sowie je einem nicht dehnbaren Gurt an der Hüfte und am Oberkörper fixiert, siehe Abbildung 4. Anschließend führten sie eine Maximalkraftkontraktion in Richtung Extension, wie oben beschrieben, aus.

Nach einer fünfminütigen Pause wurden die Teilnehmer wieder im Rückenadapter positioniert und sie führten Prohebewegungen zur motorischen Single-Task-Aufgabe (Phy)

durch, um auch hier mögliche Lern- und Automatisierungsprozesse zwischen der ersten und zweiten Durchführung gering zu halten. Die motorische Aufgabe bestand aus einer Flexion-Extensions-Bewegung mit einem Bewegungsbereich von 20° , beginnend bei 5° Flexion, wobei 0° dem aufrechten Stehen entsprach. Für die Extensionsbewegung mussten 5 % der in den MVC Messungen ermittelten Kraft als Widerstand überwunden werden. Die Bewegung wurde für zwei Minuten ausgeführt und nach einer weiteren Pause von fünf Minuten außerhalb des Dynamometers erfolgte für den Zeitraum von zwei Minuten die Bewegungsaufgabe mit der zusätzlichen Bearbeitung des PASAT-Tests als Dual-Task-Bedingung (Phy+Cog). Nach weiteren fünf Minuten Pause absolvierten die Teilnehmer für zwei Minuten eine Parallelversion der PASAT-Aufgabe im Sitzen als kognitive Single-Task-Aufgabe (Cog). Nach jeder Bedingung wurde eine Skala zur Messung der subjektiven Beanspruchung ausgefüllt.

Abbildung 4

Positionierung der Teilnehmer im Dynamometer



6.1.3 Instrumente, Messungen und Datenanalyse

Elektromyographische Aktivität

Die elektromyographische Aktivität wurde erhoben, wie in Kapitel 4.3 beschrieben. Aufgrund der dynamischen Bedingung wurde in dieser Studie für die Berechnung der RMS-Werte ein im Vergleich zu Studie 1 kürzeres Zeitfenster von 50 Millisekunden zugrunde gelegt, um das Risiko einer Phasenverschiebung zu minimieren (Freiwald et al., 2007; Konrad, 2005). Anschließend wurden die Werte über die Versuchsbedingung hinweg gemittelt. Zur Normalisierung der Daten wurden die in den einzelnen Bedingungen erhobenen Werte mit dem höchsten gemessenen Wert während der MVC-Messungen ins Verhältnis gesetzt und somit von Mikrovolt auf Prozente des Referenzwertes skaliert (%MVC). Die hieraus resultierende Größe kontrolliert mögliche Einflüsse der lokalen Ableitbedingungen und erlaubt eine Aussage über die neuromuskuläre Beanspruchung (Burden, 2010; Pfeifer et al., 2003; Soderberg & Knutson, 2000).

Aus den erhaltenen Werten wurden die Dysbalance-Ratios, wie in 4.4 beschrieben, für die einzelnen Muskelpaare bestimmt und daraus die Mittelwerte für den oberen und unteren Rückenbereich berechnet. Zusätzlich zu den absoluten statischen Dysbalancen wurden Veränderungen von höherer rechts- oder linksseitiger Aktivierung des jeweiligen Muskelpaares im zeitlichen Verlauf als dynamische muskuläre Dysbalancen berücksichtigt. Die seitenbezogenen Änderungen der Belastungen unter den verschiedenen Bedingungen wurden folgendermaßen bestimmt: nach dem Filtern der Daten mit einem Tiefpassfilter von 2 Hz und dem Bilden der Differenz aus den rechts- und linksseitigen, MVC normalisierten RMS-Kurvenverläufen, wurden in einem nächsten Schritt die relativen Minima und Maxima der Graphen bestimmt und der Übergang von einem Maximum zum Minimum als Seitenwechsel definiert. Die Häufigkeiten wurden pro Bedingung und Muskelpaar für den gesamten Bewegungszyklus aufsummiert. Die weiteren Berechnungen erfolgten mit für den oberen und unteren Rückenbereich gemittelten Werten und stellten so das Maß der dynamischen Dysbalancen dar.

Bewegungserfassung

Die individuelle Bewegungsgeschwindigkeit der Teilnehmer wurde über das Dynamometer mit der Software human kinetics (CONTREX®) erfasst und in Grad pro Sekunde ausgegeben. Daraus wurde die Geschwindigkeit für den Gesamtzyklus berechnet.

Fragebogen: subjektive Beanspruchung

Um die subjektive Beanspruchung durch den kognitiven Stressor einschätzen zu können, wurde eine Papierversion der deutschen Übersetzung des *National Aeronautics and Space Administration Task Load Index* (NASA-TLX, Hart & Staveland, 1988) verwendet. Versuchspersonen bewerten die sechs Dimensionen der geistigen, körperlichen und zeitlichen Anforderungen, der Ausführung der Aufgabe, der Anstrengung und der Frustration jeweils auf einer 20-stufigen Skala. Jeder Wert wird mit fünf multipliziert und resultiert in einen Endwert zwischen 5 und 100. Die Gesamtbeanspruchung ergibt sich aus dem Mittelwert der sechs Subskalen. Der NASA-TLX hat sich in den letzten 20 Jahren zur Workload-Messung von einfachen Belastungen durch kognitive Aufgaben bis hin zur Steuerung eines Flugzeugs etabliert (Grier, 2015; Hart, 2006) und stellt das am häufigsten verwendete subjektive Einschätzungsverfahren dar (Grier, 2015). Neben der Originalfassung, die zusätzlich zur Bewertung der einzelnen Dimensionen eine Gewichtung über einen Paarvergleich der Dimensionen vornimmt, liegt mit dem Raw-TLX (RTLX) (Hart, 2006) eine modifizierte Version vor, welche in einer kürzeren Version auf diesen Paarvergleich verzichtet. Da die Beanspruchungswerte beider Versionen hoch korrelieren und zu vergleichbaren Mittelwerten und Standardabweichungen führen (Moroney et al., 1995; Nygren, 1991), wurde in dieser Arbeit der RTLX verwendet. Vorliegende Studien zur Reliabilität und Validität bescheinigen dem RTLX gute psychometrische Eigenschaften. So konnten beispielsweise Longo und Leva (2019) eine hohe interne Konsistenz mit einem Cronbachs Alpha von .85 aufzeigen sowie Hart und Staveland (1988) eine Retest-Reliabilität von .83. Bezüglich der Validität des Verfahrens liegen konsistente Ergebnisse zur Übereinstimmung von Beanspruchung und Schwierigkeit der Aufgabe vor (Bittner et al., 1989; Mansikka et al., 2019), jedoch wird die Konstruktvalidität kontrovers diskutiert und, in Abhängigkeit von der untersuchten Belastung, die Validität entsprechend als eingeschränkt bewertet (McKendrick & Cherry, 2018; Winter, 2014). Zur Normierung und Interpretation des RTLX liegt ein Vergleich von 1173 Studien vor (Grier, 2015), der eine Einordnung des Ergebniswertes im Hinblick auf Vergleichswerte bei ähnlichen Aufgabentypen zulässt.

Aus den Skalen des NASA-TLX wurde die ungewichtete mittlere Beanspruchung durch eine Addition der einzelnen Skalenwerte und eine Division durch die Anzahl der Skalen berechnet (NASA-RTLX). Daneben wurden die in kognitiv-motorischen Dual-Task-Aufgaben besonders sensitiven Dimensionen der mentalen und körperlichen Anforderungen sowie der Frustration berücksichtigt (DiDomenico & Nussbaum, 2008; Nimbarte et al., 2012).

Kognitive Leistung

Der Leistungsparameter aus dem PASAT wurde durch die Auswertung des Anteils korrekter Antworten an allen Antworten in Prozent ermittelt.

Berechnung von Reaktivitätswerten

Reaktivitätswerte als Maß für die Stärke der Reaktion von der Single-Task zur Dual-Task-Bedingung wurden als Differenzen der Werte der Dual-Task-Bedingung und der Single-Task-Bedingung berechnet.

6.1.4 Statistische Auswertung

Die demographischen und anthropometrischen Daten der Versuchspersonen wurden mit einer multivariaten Varianzanalyse mit den abhängigen Variablen „Alter“, „Gewicht“ und „Größe“ sowie der unabhängigen Variablen „Geschlecht“ verglichen. Unterschiede zwischen den drei Bedingungen (Phy, Cog, Phy+Cog) und auch Unterschiede zwischen Dual-Task- und Single-Task-Bedingung wurden mithilfe von Varianzanalysen mit Messwiederholung berechnet. Auch in dieser Studie wurden bei Verletzungen der Sphärizitätsannahme die Freiheitsgrade mit der Methode nach Greenhouse und Geisser (1959) korrigiert. Zusammenhänge zwischen einzelnen Variablen wurden mit der Produkt-Moment-Korrelation von Pearson berechnet, respektive beim Vorliegen von extremen Ausreißern mit nichtparametrischen Verfahren nach Spearman. Bei multiplen Mittelwertvergleichen und auch bei der Berechnung der Korrelationen wurde das Alphaniveau mit der Bonferroni Methode angepasst (Bland & Altman, 1995). Effektstärken werden bei Varianzanalysen mit Messwiederholung mit η_p^2 , bei T-Tests mit d und beim Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest mit r angegeben. Zur Identifikation von Untergruppen mit ähnlicher Reaktivität in Bezug auf statische Dysbalancen wurde eine hierarchische Clusteranalyse durchgeführt. Die Voraussetzungen einer ausreichend großen Stichprobe waren nach Formann (1984) mit 2^k mit k als Anzahl der berücksichtigten Variablen gegeben. Die Unabhängigkeit der Variablen wurde im Vorfeld anhand der Produkt-Moment-Korrelationen von Pearson überprüft. Als Proximitätsmaß wurde die quadrierte Euklidische Distanz verwendet und als Fusionierungsalgorithmus das Agglomerierungsverfahren nach Ward (1963). Die verwendeten Daten wurden vor der Analyse z-standardisiert. Die optimale Clusteranzahl wurde durch eine visuelle Inspektion der Agglomerationskoeffizienten und des Dendogramms bestimmt. Die identifizierten Gruppen wurden mit dem Mann-Whitney-U-Test auf Unterschiede überprüft und die Effektstärke mit r angegeben.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Fragebogen zur Erhebung der demographischen Variablen

Das Alter der Frauen ($M = 22.14$ Jahre, $SD = 2.66$, 95% KI [20.61, 23.68]) und Männer ($M = 22.92$ Jahre, $SD = 2.02$, 95% KI [22.09, 23.75]) unterschied sich nicht, $F(1, 37) = 1.06$, $p = .31$. Hinsichtlich der Größe gab es einen signifikanten Gruppenunterschied zwischen Frauen ($M = 170.14$ cm, $SD = 8.37$, 95% KI [165.31, 174.97]) und Männern ($M = 180.84$ cm, $SD = 6.05$, 95% KI [178.34, 183.34]), $F(1, 37) = 21.24$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .37$, und auch hinsichtlich des Gewichtes unterschieden sich die Frauen ($M = 63.71$ kg, $SD = 9.82$, 95% KI [58.05, 69.38]) von den Männern, ($M = 79.04$ kg, $SD = 12.42$, 95% KI [73.91, 84.17]), $F(1, 37) = 15.74$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .30$.

6.2.2 Manipulationsüberprüfung: subjektive Einschätzung der Workload

Die subjektive Workload wurde in der Dual-Task-Bedingung am höchsten eingeschätzt, sowohl hinsichtlich der Gesamtbeanspruchung als auch auf den Ebenen der geistigen Anforderung und der Frustration. Am körperlich anstrengendsten wurde die physische Single-Task-Situation erlebt, im Gegensatz dazu die kognitive Single-Task-Situation als am wenigsten körperlich anstrengend, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6

Einschätzung der subjektiven Workload (Mittelwerte, Standardabweichung und Konfidenzintervalle)

Anforderung	Phy		Phy + Cog		Cog	
	<i>M</i> (<i>SD</i>)	95% KI	<i>M</i> (<i>SD</i>)	95% KI	<i>M</i> (<i>SD</i>)	95% KI
Geistige Anforderung	24.36 (17.96)	[18.54, 30.18]	71.54 (20.65)	[64.84, 78.23]	63.72 (22.18)	[56.53, 70.91]
Körperliche Anforderung	60.26 (20.80)	[53.51, 67.00]	55.26 (25.31)	[47.05, 63.46]	18.97 (18.43)	[13.72, 25.13]
Frustration	14.87 (10.23)	[11.56, 18.19]	43.08 (26.15)	[34.74, 51.27]	38.08 (25.38)	[29.74, 45.77]
NASA-RTLX	36.58 (10.27)	[33.10, 39.81]	57.61 (13.61)	[53.82, 61.67]	44.34 (14.40)	[39.53, 48.91]

Anmerkung. M = Mittelwert; SD = Standardabweichung; KI = Konfidenzintervall; NASA-RTLX = Gesamtbeanspruchung; Phy = Körperliche Single-Task-Aufgabe, Phy + Cog = Dual-Task-Aufgabe, Cog = Kognitive Single-Task-Aufgabe

Die subjektive Einschätzung zur Workload wurde mit einer Varianzanalyse mit Messwiederholung überprüft, mit den Innersubjektfaktoren „Bedingung“ (Phy, Phy+Cog, Cog) und dem NASA-RTLX als Gesamtbeanspruchung und den Beanspruchungsdimensionen der geistigen und körperlichen Anforderungen sowie der Frustration als abhängige Variablen. Für den Faktor „Bedingung“ ergab sich bei allen abhängigen Variablen signifikante Ergebnisse, NASA-RTLX: $F(2, 76) = 42.79, p < .001, \eta_p^2 = .53$, geistigen Anforderungen: $F(1.70, 64.59) = 110.63, p < .001, \eta_p^2 = .74$, körperliche Anforderungen: $F(2, 76) = 64.37, p < .001, \eta_p^2 = .63$, und Frustration: $F(2, 76) = 23.85, p < .001, \eta_p^2 = .39$, siehe Abbildung 5.

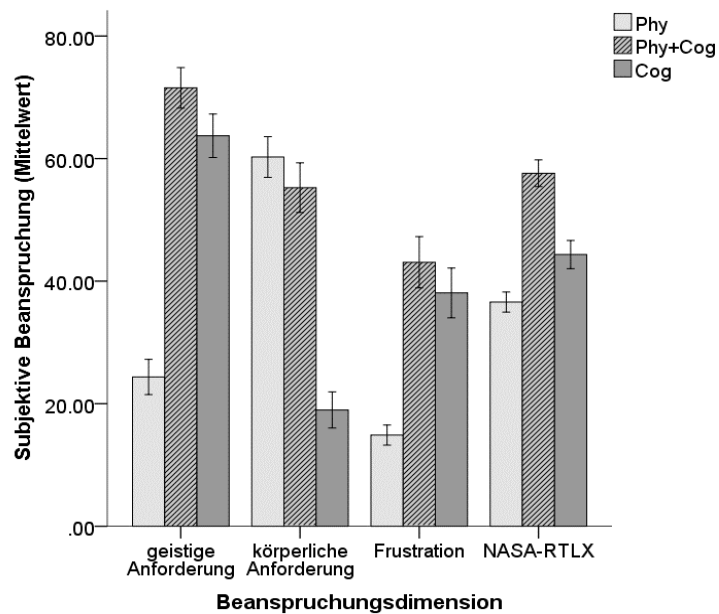
Hinsichtlich der Gesamtbeanspruchung unterschieden sich alle drei Bedingungen signifikant voneinander. Die Beanspruchung in der Phy+Cog-Bedingung unterschied sich signifikant von der Phy-Bedingung, $t(38) = 10.55, p < .001, d = 1.74$ (95% KI [1.21, 2.27]), und auch von der Cog-Bedingung, $t(38) = 5.50, p < .001, d = 1.25$ (95% KI [0.75, 1.74]), wobei die Cog-Bedingung zu einer höheren subjektiven Beanspruchung als die Phy-Bedingung, $t(38) = 3.15, p = 0.003, d = 0.71$ (95% KI [0.25, 1.18]), führte.

Auf der Ebene der einzelnen Subskalen ergab sich ein ähnliches Bild für die Beanspruchungsdimension der geistigen Anforderungen. Die Phy+Cog-Bedingung brachte eine höhere geistige Beanspruchung mit sich als die Phy-Bedingung, $t(38) = 13.62, p < .001, d = 3.08$ (95% KI [2.42, 3.75]), und auch als die Cog-Bedingung, $t(38) = 2.93, p = .006, d = 0.66$ (95% KI [0.20, 1.13]). Die Cog-Bedingung wies darüber hinaus eine höhere geistige Beanspruchung auf als die Phy-Bedingung, $t(38) = 9.99, p < .001, d = 2.26$ (95% KI [1.68, 2.84]).

Die Phy- und die Phy+Cog-Bedingung unterschieden sich nicht in Bezug auf die körperliche Beanspruchung, $t(38) = 1.21, p = .23$. Beide wiesen jedoch signifikant höhere Werte im Vergleich zur Cog-Bedingung auf, nämlich Phy- zu Cog-Bedingung: $t(38) = 10.48, p < .001, d = 2.37$ (95% KI [1.79, 2.96]), und Phy+Cog-zu Cog-Bedingung: $t(38) = 9.43, p < .001, d = 2.14$ (95% KI [1.57, 2.70]). Sowohl die Phy+Cog-Bedingung als auch die Cog-Bedingung wurden frustrierender erlebt als die Phy-Bedingung, Phy+Cog-Bedingung zu Phy-Bedingung: $t(38) = 6.77, p < .001, d = 1.53$ (95% KI [1.02, 2.05]), Cog-Bedingung zu Phy-Bedingung: $t(38) = 5.56, p < .001, d = 1.26$ (95% KI [0.77, 1.75]). Die Phy+Cog- und die Cog-Bedingung unterschieden sich nicht hinsichtlich der erlebten Frustration, $t(38) = 1.06, p = .30$.

Abbildung 5

Mittlere subjektive Beanspruchung in den einzelnen Bedingungen



Anmerkung. Mittlere subjektive Beanspruchung für drei Subskalen und den Gesamtwert des NASA-TLX. Phy = körperliche Single-Task-Aufgabe, Phy+Cog = Dual-Task-Aufgabe, Cog = kognitive Single-Task-Aufgabe; Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwertes.

6.2.3 Statische und dynamische muskuläre Dysbalancen

Absolute statische muskuläre Dysbalancen

In Bezug auf die statischen muskulären Dysbalancen wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Innersubjektfaktoren „Bedingung“ (Phy, Phy+Cog) und „Lokalisation“ (oberer Rücken, unterer Rücken), sowie dem Zwischensubjektfaktor „Geschlecht“ durchgeführt. Es ergaben sich signifikante Haupteffekte für den Faktor „Bedingung“, $F(1, 37) = 11.36$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .24$, und den Faktor „Lokalisation“, $F(1, 37) = 26.25$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .42$. Der Haupteffekt für den Faktor „Geschlecht“, $F(1, 37) = 0.75$, $p = .39$, wies keine Signifikanz auf, siehe Tabelle 7. Ebenso zeigten sich keine signifikanten Interaktionseffekte, für alle Interaktionen $p > .05$.

Tabelle 7*Deskriptive Daten zu den Haupteffekten*

Haupteffekt		Statische Dysbalancen	
		<i>M (SD)</i>	<i>95% KI</i>
Bedingung	Phy	0.95 (0.82)	[0.72, 1.08]
	Phy+Cog	1.19 (1.45)	[0.80, 1.45]
Lokalisation	Oberer Rücken	1.60 (1.41)	[1.32, 1.94]
	Unterer Rücken	0.39 (0.23)	[0.34, 0.45]
Geschlecht	Frauen	1.15 (1.40)	[0.61, 1.69]
	Männer	0.92 (0.89)	[0.66, 1.17]

Anmerkung. M = Mittelwert; SD = Standardabweichung; Phy = Körperliche Single-Task-Aufgabe, Phy + Cog = Dual-Task-Aufgabe

Der Haupteffekt des Faktors „Bedingung“ äußerte sich darin, dass die statischen Dysbalancen in der Phy-Bedingung geringer ausfielen als in der Phy+Cog-Bedingung und der Haupteffekt des Faktors „Lokalisation“ manifestierte sich in höheren Dysbalancen im oberen Rücken im Vergleich zum unteren Rücken.

Dynamische Dysbalancen

Veränderungen der dynamischen Dysbalancen von der Phy- zur Phy-Cog-Bedingung wurden aufgrund des Vorliegens extremer Ausreißer mit einem Wilcoxon-Rangsummen-Test berechnet. Es zeigten sich in der Phy+Cog Bedingung mehr dynamische Dysbalancen im oberen Rücken ($Mdn = 21$, $IQR = 33$) als in der Phy-Bedingung ($Mdn = 8$, $IQR = 23$), $Z(39) = 2.11$, $p = .02$, $r = .34$. Im unteren Rücken hingegen wurde der Unterschied zwischen der Phy-Cog Bedingung ($Md = 69$, $IQR = 44$) und der Phy-Bedingung ($Mdn = 52$, $IQR = 46$) nicht signifikant, $Z(39) = 1.02$, $p = .17$. Ein Vergleich der dynamischen Dysbalancen im oberen Rückenbereich und unteren Rückenbereich ergab sowohl für die Phy+Cog Bedingung, $Z(39) = 5.05$, $p < .001$, $r = .81$, als auch für die Phy-Bedingung, $Z(39) = 5.25$, $p < .001$, $r = .84$, signifikant mehr dynamische Dysbalancen im unteren Rückenbereich als im oberen Rückenbereich.

Zusammenhänge der statischen und dynamischen Dysbalancen

Zur Validierung des Parameters der dynamischen Dysbalancen wurden die in der Phy- und Phy+Cog-Bedingung gemessenen statischen und dynamischen Dysbalancen für alle sechs Muskelpaare in Zusammenhang gesetzt. Für die sechs Muskelpaare ergab sich für den Esl eine signifikante negative Korrelation, sowohl in der Phy-Bedingung $r_s = -.67$ (95% KI [-.78, -.54]), $p < .001$, als auch in der Phy+Cog-Bedingung, $r_s = -.49$ (95% KI [-.68, -.24]), $p < .001$. Alle anderen Muskelpaare zeigten keine signifikanten Zusammenhänge, weder in der Phy-Bedingung noch in der Phy+Cog-Bedingung.

Darüber hinaus wurden Zusammenhänge zwischen den Reaktivitäten der statischen und dynamischen Dysbalancen sowohl im oberen als auch im unteren Bereich des Rückens berechnet. Während die statischen und dynamischen Dysbalancen in beiden Bereichen des Rückens jeweils signifikante negative Zusammenhänge aufwiesen, korrelierten weder die statischen noch die dynamischen Dysbalancen des oberen und unteren Rückenbereichs, siehe Tabelle 8.

Tabelle 8

Korrelationskoeffizienten und Konfidenzintervalle der Zusammenhänge der Stressreaktivitäten auf muskulärer Ebene

	1	2	3	4
1. Statische Dysbalancen oberer Rücken	—			
2. Statische Dysbalancen unterer Rücken	.03 [-.22, .36]	—		
3. Dynamische Dysbalancen oberer Rücken	-.45** [-.68, -.10]	-.06 [-.28, .16]	—	
4. Dynamische Dysbalancen unterer Rücken	.17 [-.29, .44]	-.56** [-.74, -.31]	.17 [-.09, .49]	—

Anmerkung. ** = Signifikanz auf 0.001 Niveau (Korrektur nach Bonferroni)

6.2.4 Bewegungsgeschwindigkeit und kognitive Leistung

Bei der Bewegungsgeschwindigkeit unterschieden sich auf der Ebene des gesamten Bewegungszyklus die Phy-Bedingung ($M = 10.08^\circ/\text{sec}$, $SD = 1.76$, 95% KI [9.49, 10.57]) und die Phy+Cog-Bedingung ($M = 10.67^\circ/\text{sec}$, $SD = 1.23$, 95% KI [10.25, 11.03]) signifikant, $t(38) = 2.44$, $p = .02$, $d = 0.55$ (95% KI [0.09, 1.01]). Hinsichtlich der kognitiven Leistung wurde in der Cog-

Bedingung ($M = 87.68$; $SD = 10.90$; 95% KI [84.41, 91.27]) eine signifikant bessere Leistung im PASAT erzielt, als in der Phy+Cog-Bedingung ($M = 78.69$; $SD = 17.99$; 95% KI [73.13, 84.34]), $t(36) = 3.94$, $p < .001$, $d = 0.92$ (95% KI [0.43, 1.40]).

Bei Betrachtung der Zusammenhänge der Reaktivitäten auf motorischer und kognitiver Ebene ergab sich nach Bonferroni-Korrektur des Alphaniveaus eine signifikante negative Korrelation zwischen der Reaktivität des PASAT-Wertes und der Reaktivität der Bewegungsgeschwindigkeit, $r = -.58$, $p < .001$. Zwischen den Reaktivitäten der dynamischen und der absoluten Dysbalancen im oberen und unteren Rücken und der Reaktivität der kognitiven Leistung ergaben sich keine signifikanten Zusammenhänge (für alle $p > .05$).

6.2.5 Clusteranalyse: Statische Dysbalancen

Eine Untersuchung der Agglomerationskoeffizienten und des Dendogramms wies auf eine optimale Lösung von zwei Clustern hinsichtlich der Reaktivitäten der statischen Dysbalancen im oberen und unteren Rücken hin. Cluster 1 zeichnete sich durch eine geringe Abnahme der statischen muskulären Dysbalancen sowohl im oberen als auch im unteren Rücken aus, Cluster 2 durch eine Zunahme der statischen muskulären Dysbalancen in beiden Rückenbereichen, siehe Tabelle 9.

Tabelle 9

Mediane und Interquartilbereich der Reaktivitäten je Cluster

Reaktivitäten	Cluster 1 (N = 25)		Cluster 2 (N = 14)	
	<i>Mdn</i>	<i>IQR</i>	<i>Mdn</i>	<i>IQR</i>
Statische Dysbalancen oberer Rücken	-0.06	[-0.17, 0.09]	0.49	[0.05, 0.90]
Statische Dysbalancen unterer Rücken	-0.00	[-0.11, 0.06]	0.21	[-0.02, 0.47]
Dynamische Dysbalancen oberer Rücken	8.00	[-1.00, 20.50]	0.00	[-8.50, 4.75]
Dynamische Dysbalancen unterer Rücken	9.50	[-10.50, 33.75]	-8.00	[-20.75, 6.75]
Bewegungsgeschwindigkeit (°/sec)	0.73	[0.33, 1.33]	0.02	[-0.73, 0.82]
PASAT-Wert	-6.85	[-11.83, -0.55]	-10.25	[-20.58, 1.00]

Anmerkung. Mdn = Median, IQR = Interquartilbereich

Die Reaktivitäten der statischen Dysbalancen der beiden Cluster wurden aufgrund ungleicher Varianzen mit dem Mann-Whitney-U-Test verglichen. Sowohl im oberen Rücken, $U(25, 14) = 52$, $z = 3.61$, $p < .001$, $r = .58$, als auch im unteren Rücken, $U(25, 14) = 84$, $z = 2.66$, $p = .007$, $r = .43$, unterschieden sich diese signifikant.

Des Weiteren wurde überprüft, ob sich die beiden Cluster hinsichtlich der Reaktivitäten der dynamischen Dysbalancen im oberen und unteren Rücken, der Bewegungsgeschwindigkeit und der kognitiven Leistung unterschieden. Es ergaben sich Unterschiede in Bezug auf die dynamischen Dysbalancen im unteren Rücken, $U(25, 14) = 107$, $z = 1.99$, $p = .04$, $r = .32$, und die Bewegungsgeschwindigkeit, $U(25, 14) = 102$, $z = 2.14$, $p = .03$, $r = .34$. Cluster 1 zeigte eine Zunahme der dynamischen Dysbalancen und eine höhere Bewegungsgeschwindigkeit, Cluster 2 hingegen eine Abnahme der dynamischen Dysbalancen sowie eine nahezu unveränderte Bewegungsgeschwindigkeit. Hinsichtlich der Reaktivitäten der dynamischen Dysbalancen im oberen Rücken und des PASAT-Wertes ergaben sich keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppierungen.

6.3 Diskussion

Im Rahmen der zweiten Studie stand im Mittelpunkt, wie sich kurzfristig wirksamer kognitiver Stress während einer definierten Bewegung mit selbstgewählter Geschwindigkeit auf muskuläre Dysbalancen auswirkt. Die Bewegung wurde mit und ohne zusätzlichen kognitiven Stressor durchgeführt. Neben den absoluten statischen Dysbalancen wurde die Variable der dynamischen Dysbalancen als weiterer Parameter auf muskulärer Ebene eingeführt und der Versuch einer ersten Validierung und Nützlichkeitseinschätzung unternommen. Zusätzlich wurde die Stressreaktivität mit den muskulären Dysbalancen, der Bewegungsgeschwindigkeit und der kognitiven Leistung in Zusammenhang gesetzt, um mögliche Interferenzen und Priorisierungsprozesse der kognitiven und motorischen Leistung zu bestimmen. Zur Identifikation möglicher sich unterscheidender Muster der motorischen Kontrolle wurde eine Clusteranalyse durchgeführt.

Die statischen muskulären Dysbalancen nahmen sowohl für den oberen als auch den unteren Rückenbereich in der Dual-Task-Bedingung im Vergleich zur körperlichen Single-Task-Bedingung zu, wobei sich im oberen Rücken signifikant höhere muskuläre Dysbalancen als im unteren Rücken zeigten, wie in **Hypothese 1** postuliert. Das Geschlecht hatte keinen Einfluss auf die Muskelaktivierung unter Stress. Dieser Befund unterstützt **Hypothese 2** nicht. Für den neu eingeführten Parameter der dynamischen Dysbalancen ergaben sich erwartungskonform

Zunahmen von der körperlichen Single-Task-Bedingung zur Dual-Task-Bedingung, wie in **Hypothese 3** formuliert. Auf der Ebene der Muskelpaare war, mit Ausnahme eines Muskelpaares, kein Zusammenhang der absoluten statischen und dynamischen Dysbalancen feststellbar. Zusammengefasst für den oberen und unteren Rückenbereich, zeigten sich signifikante negative Korrelationen der Reaktivitäten der Dysbalance-Parameter. Dies spricht für die Gültigkeit des Parameters der dynamischen Dysbalancen und dafür, dass die Teilnehmer entweder eine motorische Kontrollstrategie mit höheren statischen oder mit mehr dynamischen Dysbalancen in den beiden Rückenbereichen wählten und bestätigt **Hypothese 4**. Den gesamten Bewegungszyklus betrachtend, konnte in der Dual-Task-Bedingung eine Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit festgestellt werden. Diese Ergebnisse sind nicht erwartungskonform mit **Hypothese 5**. Auf der Ebene der kognitiven Leistung zeigte sich in der Dual-Task-Bedingung eine Abnahme gegenüber der Single-Task-Bedingung, was auf eine kognitiv-motorische Interferenz hinweist. Darüber hinaus war eine gegenseitige Interferenz von Bewegungsgeschwindigkeit und kognitiver Leistung zu beobachten. Die Reaktivitäten zeigten keine weiteren Zusammenhänge, was **Hypothese 6** nur im Hinblick auf Bewegungsgeschwindigkeit und kognitive Leistung bestätigt. Eine Clusteranalyse ergab zwei sich unterscheidende Gruppierungen hinsichtlich der statischen Dysbalancen. Diese beiden Gruppierungen unterschieden sich zusätzlich in Bezug auf die Bewegungsgeschwindigkeit und die dynamischen Dysbalancen im unteren Rücken, dies stützt **Hypothese 7** in weiten Teilen.

Manipulationsüberprüfung

Der höhere Gesamtbeanspruchungswert in der Dual-Task-Bedingung im Vergleich zu den beiden Single-Task-Bedingungen spricht für eine erfolgreiche Stressinduktion auf subjektiver Ebene. Konsistent zu kognitiv-motorischen Dual-Task-Studien (DiDomenico & Nussbaum, 2008; Nimbarde et al., 2012) war, neben der hohen Gesamtbeanspruchung in der Dual-Task-Bedingung, ein höherer Wert in der kognitiven als in der körperlichen Single-Task-Bedingung feststellbar, wobei der Effekt geringer ausfiel, als für die Unterschiede der Dual-Task-Bedingung zu den Single-Task-Bedingungen. Bei den beiden Bedingungen mit der körperlichen Aufgabe traten vergleichbare Werte auf der Ebene der körperlichen Anforderungen auf sowie signifikant höhere Werte als in der kognitiven Single-Task-Bedingung. Der PASAT-Test führte sowohl in der Dual-Task-Bedingung als auch in der kognitiven Single-Task-Bedingung zu höherer Frustration als die körperliche Aufgabe allein. Dies deckt sich mit Erkenntnissen, dass der PASAT-Test zu negativer Stimmungslage führt (Diehr et al., 2003; Holdwick & Wingenfeld,

1999). Jedoch zeigte sich in dieser Studie keine Abnahme der subjektiv erlebten Frustration bei der zweiten Durchführung, wie von Tombaugh (2006) postuliert. Die in diesen Studien gemessene nachlassende Frustration beziehen die Autoren auf die Lerneffekte aus der ersten Durchführung. Möglicherweise fanden diese Lerneffekte in der vorliegenden Studie bereits während der Übungsphase statt, während derer die Teilnehmer die PASAT-Aufgabe bearbeiteten, bis sie das Kriterium sechs Items fehlerfreier Items erfüllten. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um Neuigkeitseffekte zu vermeiden und die in Studien mehrfach festgestellte Leistungsverbesserung, insbesondere zwischen erster und zweiter Durchführung, zu reduzieren (Johnson et al., 1997; MacNeilage, 1966).

Muskuläre Dysbalancen

In beiden Bedingungen wurden im oberen Bereich des Rückens höhere statische muskuläre Dysbalancen festgestellt als im unteren Bereich. Eine mögliche Erklärung für die geringere asymmetrische Muskelaktivierung im unteren Rücken könnte eine Überlagerung der Dysbalancen in diesem Bereich durch eine höhere körperliche Belastung und damit allgemein höhere Muskelaktivierung aufgrund der Extensionsbewegung sein. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Oddson und de Luca (2003), die unter ansteigender körperlicher Belastung geringere muskuläre Dysbalancen bei gesunden Teilnehmern beobachteten. Die absoluten statischen Dysbalancen nahmen, unabhängig von Lokalisation und Geschlecht, von der Single-Task- zur Dual-Task-Bedingung zu, wobei der durch die kognitive Aufgabe bedingte Dual-Task-Effekt aufgrund der Dysfunktionalität der asymmetrischen Muskelaktivierung den Dual-Task-Kosten zuzuordnen ist. So kann aus den Ergebnissen dieser Studie geschlossen werden, dass neben den entsprechenden Erkenntnissen von Marras et al. (2000) und Davis et al. (2002), dass die allgemeine Muskelaktivierung während dynamischer Belastungen unter zusätzlicher kognitiver Beanspruchung zunimmt, sich auch die als dysfunktional zu betrachtenden Muster einer Rechts-Links-Asymmetrie (van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003) während einer Bewegung unter Stress für den gesamten Bereich des Rückens erhöhen. Dieser Effekt zeigte sich unter der geringen körperlichen Beanspruchung der vorliegenden Studie. Einen Erklärungsansatz für die höhere Muskelaktivität unter geringen körperlichen Anforderungen bietet die *Neuromotor Noise Theory* (NNT) (van Galen & van Huygevoort, 2000; van Gemmert & van Galen, 1997). Neben der Muskelaktivierung, die für die dynamische Bewegung notwendig ist, tritt nach dieser Theorie eine allgemeine Erhöhung der muskulären Aktivierung als Filtermechanismus auf, um dem durch den kognitiven Stressor erhöhten neuromotorischen

Rauschlevel zu begegnen. Ziel ist es, den Rauschlevel zu reduzieren, was vor allem durch eine Erhöhung der Gliedmaßensteifigkeit erreicht wird. Diese Steifigkeit wiederum wird durch eine höhere statische Muskelaktivität und Kokontraktion erzielt. Ursprünglich wurde die NNT für kleinräumige Zielbewegungen formuliert (van Galen et al., 1990), jedoch wurden die Annahmen dieser Theorie auch für etwas großräumigere Bewegungen bestätigt (van Galen et al., 2002; van Loon et al., 2001). Bezogen auf die Flexion-Extensionsbewegung in der vorliegenden Studie bedeutet dies, dass über eine höhere rechts- und linksseitige Aktivierung die Steifigkeit und Stabilität der Wirbelsäule erhöht werden soll, um das durch den kognitiven Stressor ausgelöste Rauschen zu reduzieren. Jedoch zeigen unsere Ergebnisse, dass diese Muskelaktivierung nicht symmetrisch auftritt, sondern die in der physikalischen Single-Task-Bedingung festgestellten Asymmetrien deutlicher akzentuiert.

Unabhängig von der Bedingung zeigten sich im unteren Bereich des Rückens mehr dynamische Dysbalancen und damit ein häufigerer Belastungswechsel von einer Seite zur anderen als im oberen Bereich. Von der Single- zur Dual-Task-Bedingung nahmen die dynamischen Dysbalancen im oberen Bereich des Rückens, nicht aber im unteren Bereich des Rückens zu. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die zu beobachtenden höheren statischen Dysbalancen im unteren Bereich des Rückens als deutlich bevorzugte Kontrollstrategie während der Dual-Task-Bedingung gewählt wurde. Die Erhöhung der dynamischen Dysbalancen im oberen Bereich des Rückens könnte nach Passatore und Roatta (2006) wie folgt erklärt werden. Mentale Anforderungen führen unter anderem zu einer Veränderung der Muskelkontraktilität und der Sensitivität der Muskelspindeln, was sich wiederum in einer Beeinträchtigung der Propriozeption unter dynamischen Belastungen äußern kann (H. Johansson et al., 2003). Die durch die dynamischen Dysbalancen abgebildeten Belastungswechsel, von einer zur anderen Seite der Wirbelsäule, könnten diese Veränderungen im oberen Rücken abbilden.

Insgesamt sprechen die Ergebnisse nicht für einheitliche Reaktionsmuster über alle Teilnehmer hinweg. Neben der gemessenen hohen Variabilität weisen die negativen Korrelationen der Reaktivitäten der absoluten und dynamischen Dysbalancen darauf hin, dass Teilnehmer entweder mit höheren statischen Dysbalancen oder mit mehr dynamischen Dysbalancen in einem Rückenbereich reagieren. Zusätzlich konnten in der Clusteranalyse zwei unterschiedliche Reaktionsmuster auf den kurzfristig wirksamen Stressor identifiziert werden. Während ca. zwei Drittel der Teilnehmer mit einer leichten Abnahme der statischen Dysbalancen und Zunahmen der dynamischen Dysbalancen sowohl im oberen als auch unteren Rücken re-

agierten, traten bei den übrigen Teilnehmer eine deutliche Zunahme auf der Ebene der statischen Dysbalancen sowie nur leichte Veränderungen hinsichtlich der dynamischen Dysbalancen auf. Ob diese beiden Gruppierungen der aktuell in der Literatur anzutreffenden Unterscheidung einer eher lockeren bzw. festen motorischen Kontrolle (van Dieën et al., 2019) entspricht, haben künftige Studien noch zu zeigen. Sollte sich dies bestätigen, kann gefolgert werden, dass die entsprechenden Prozesse unabhängig von Rückenschmerzen auftreten und eventuell zu deren Entstehung beitragen, da sie auf längere Sicht durchaus negative Auswirkungen haben können. Während eine feste motorische Kontrolle zu höheren Wirbelsäulenbelastungen (Marras et al., 2001) führen kann, mag eine lockere motorische Kontrolle längerfristig Gewebeverletzungen nach sich ziehen (Panjabi, 2006; van Dieën & Kingma, 2013).

Das Geschlecht hatte keinen Einfluss auf die Höhe der statischen Dysbalancen. Dies entspricht nicht den Ergebnissen von Davis et al. (2002) und Marras et al. (2000), die unter kognitiv-motorischen Dual-Task-Bedingungen einen entsprechenden Effekt in Form unterschiedlicher Aktivierungen im unteren Rücken feststellten. Pereira et al. (2015) fanden vor allem bei der Koaktivierung der antagonistischen Muskulatur Unterschiede zwischen jungen Frauen und Männern in einer Dual-Task-Bedingung. Dieser Befund der höheren Koaktivierung der Bauchmuskulatur trat auch unabhängig von zusätzlicher kognitiver Belastung auf (Larivière et al., 2019) und weist somit auf unterschiedliche Mechanismen der Wirbelsäulenstabilisierung hin. Dass in der vorliegenden Studie keine Geschlechtsunterschiede festgestellt wurden, kann auf zwei Faktoren zurückgeführt werden. Zum einen wurde hier die Bauchmuskulatur nicht berücksichtigt und zum anderen wurde in den oben erwähnten Studien die allgemeine Muskelaktivierung im unteren Rücken untersucht, nicht aber statische Dysbalancen.

Bewegungsgeschwindigkeit und kognitive Leistung

Den gesamten Bewegungszyklus betrachtend, führte die Dual-Task-Bedingung zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit. Dies steht im Widerspruch zu Befunden, dass sich die Bewegung während kognitiv-motorischer Dual-Task-Aufgaben verlangsamt (Al-Yahya et al., 2011; Patel et al., 2014; Yogev-Seligmann et al., 2008), wobei hier motorisch-kognitive Interferenzen primär mit Gehen als motorischer Aufgabe untersucht wurden. Gehen, insbesondere unter standardisierten, wenig anspruchsvollen Bedingungen, wurde aufgrund der primären Steuerung über subkortikale Systeme lange Zeit als hochautomatisierte Bewegung betrachtet (Nutt et al., 1993). Studien mit bildgebenden Verfahren ergaben jedoch Hinweise auf eine Beteiligung weiterer Gehirnregionen wie dem präfrontalen Cortex, was dem angenommenen

Automatisierungsgrad beim Gehen entgegensteht (Hamacher et al., 2015; Harada et al., 2009). Die kognitiv-motorischen Interferenzen beim Gehen können deshalb unter Heranziehung von Theorien der begrenzten Verarbeitungskapazität erklärt werden (Kahneman, 1973; McLeod, 1977). Die in dieser Studie festgestellte höhere Geschwindigkeit kann, im Gegensatz zu der beim Gehen zu beobachtenden gegenseitigen Interferenz, als *motor-priority trade-off* und damit eine Priorisierung der Extensions-Flexions-Bewegung gegenüber der kognitiven Aufgabe eingeordnet werden (Plummer et al., 2013). Dieses Interferenzmuster lässt sich im Kontext des während posturaler Aufgaben zu beobachtenden U-förmigen Zusammenhangs von kognitiver Aufgabenschwierigkeit und motorischer Leistung erklären (Lacour et al., 2008). Da bei mittlerem Schwierigkeitsgrad Aufmerksamkeit von der motorischen Aufgabe abgezogen und eine geringere bewusste motorische Kontrolle ausgeübt wird, kommt es zu einer Ausführung der Bewegung mit einem höheren Automatisierungsgrad und höherer Effizienz (Riley et al., 2003). Außerdem könnte der durch den kognitiven Stressor ausgelöste emotionale Zustand zu einer veränderten motorischen Aufgabenausführung geführt haben. Das durch die PASAT-Aufgabe bedingte Arousal (Mathias et al., 2004) und die induzierte negative Stimmungslage (Diehr et al., 2003) mögen zu einer veränderten insbesondere schnelleren Ausführung von Bewegungen führen (Beste et al., 2013; Coombes et al., 2008; Naugle et al., 2012).

Bezüglich der kognitiven Leistung zeigten die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung, konsistent mit der allgemeinen Studienlage zu kognitiv-motorischen Dual-Task-Aufgaben mit leichter motorischer Aufgabe und subjektiv beanspruchend erlebter kognitiver Aufgabe (Yogev-Seligmann et al., 2008), eine Beeinträchtigung der kognitiven Leistung in der Dual-Task-Situation. Eine Betrachtung der Zusammenhänge der Reaktivitäten der Bewegungsgeschwindigkeit und der kognitiven Leistung erlauben weitere Schlussfolgerungen zu den wechselseitigen Interferenzen (Plummer & Eskes, 2015). Die in dieser Studie festgestellten negativen Korrelationen lassen sich, zusätzlich zu der oben erwähnten Möglichkeit einer höheren Bearbeitungseffizienz unter Stress, so einordnen, dass bei einigen Teilnehmer eine Priorisierung zugunsten der motorischen Aufgabe, bei anderen dagegen zugunsten der kognitiven Aufgabe stattgefunden hat (Woollacott & Shumway-Cook, 2002), im Sinn einer flexiblen Zuteilung von Kapazitäten (Fischer & Plessow, 2015). Auch wenn sich die erhöhte Bewegungsgeschwindigkeit grundlegend als ein *motor priority trade-off* einordnen lässt, sei an dieser Stelle auf die Möglichkeit verwiesen, dass eine höhere Geschwindigkeit mit negativen Auswirkungen in Form ungenauerer Bewegungen sowie stärkeren einwirkenden Kräften auf die spinalen Struk-

turen einhergehen kann. Dies unterstreicht auch eine Auswertung weiterer kinematischer Daten der vorliegenden Studie (Suess, 2019), die insbesondere an den Umkehrstellen der Bewegung höhere aufgewandte Kräfte nachweisen konnte.

Klinische Relevanz

Die mittlere Erhöhung der statischen Dysbalancen von der körperlichen Single-Task-Bedingung zur Dual-Task-Bedingung ist als bedeutsam einzustufen. Die Zunahmen entsprechen den Unterschieden, die Rückenschmerzpatienten im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe im unteren Rücken in einer dynamischen Belastung zeigen (Oddsson & Luca, 2003). Gleichwohl sind die beiden in der Clusteranalyse identifizierten Muster nach dem aktuellen Erkenntnisstand bei gesunden Teilnehmern nicht per se als dysfunktional einzuordnen, sondern entsprechen zwei unterschiedlichen Strategien im Umgang mit kognitiv-motorischen Dual-Task-Bedingungen. Mittel- und langfristig können die beiden Muster möglicherweise, wie oben dargestellt, über kumulative Beanspruchungen zu negativen Auswirkungen führen.

Praktische Relevanz kommt diesen Ergebnissen beispielsweise im Arbeitsleben zu, zumal sich im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung von Abläufen und entsprechend veränderten Arbeitstätigkeiten die Kombination von niedrigen physikalischen und hohen kognitiven Anforderungen für immer mehr Arbeitsplätze als charakteristisch erweisen dürfte. Diese Anforderungsarten werden bei der Analyse arbeitsbezogener Belastungsszenarien oftmals getrennt voneinander untersucht (Srinivasan et al., 2016). Die deutlichen Dual-Task-Interferenzen bei leichter körperlicher Beanspruchung sprechen jedoch dafür, diese integriert und in ihren Wechselwirkungen gesamthaft zu betrachten. Auch wenn die in dieser Studie untersuchte, restriktive Bewegung für Anforderungen des Arbeitsalltages nicht repräsentativ ist, konnten doch potenziell dysfunktionale muskuläre Muster identifiziert werden. Sollten sich diese in Längsschnittstudien als Risikofaktor für die Entstehung von Rückenschmerzen bestätigen, könnten sie gezielt erfasst und frühzeitig rückgemeldet werden.

In diesem Kontext empfiehlt sich eine differenzierte Betrachtung der bestmöglichen Passung zwischen Mustern der motorischen Kontrolle und aufgabenbezogenen Anforderungen. So kann in Arbeitssituationen, in denen mit Perturbationen zu rechnen ist, eine im Kontext fester Kontrolle erhöhte Muskelanspannung als sinnvoll erscheinen, um Bewegungstrajektorien innerhalb sinnvoller Grenzen zu halten (Vera-Garcia et al., 2006). Besteht bei einer Arbeitstätigkeit dagegen die Möglichkeit, Bewegungen variabel auszuführen, sollte diese auf der Grundlage einer eher lockeren Kontrolle auch genutzt werden, da sich hierdurch das Risiko

von Muskelermüdung oder Überbeanspruchung erkennbar verringern lässt (Srinivasan et al., 2015). Hierdurch eröffnet sich die Perspektive einer gleichzeitig leistungs- und gesundheitsförderlichen, situationsadäquat angepassten Ausprägung und Abfolge der beiden Muster der lockeren und festen Kontrolle, die über integrierte Beanspruchungsmessungen mit Echtzeitrückmeldung unmittelbar in eine effektive Selbstregulation münden könnten.

Methodische Diskussion

Bei der Interpretation der Daten sind unterschiedliche methodische Aspekte zu berücksichtigen. Aufgrund der nicht ausbalancierten Reihenfolge der einzelnen Aufgaben ist grundlegend mit Reihenfolgeeffekten zu rechnen. Es wurden mehrere Maßnahmen ergriffen, um diese zu minimieren. Zum einen wurden beide Aufgaben, sowohl die körperliche als auch die kognitive, im Vorfeld der Datenerhebung bekannt gemacht und intensiv geübt, um während der Durchführung die Übungseffekte möglichst gering zu halten. Dennoch muss aufgrund der Reihenfolge davon ausgegangen werden, dass die Dual-Task-Effekte hinsichtlich der kognitiven Leistung deutlicher und die körperlichen Dual-Task-Effekte geringer ausfallen. Die Reihenfolge wurde aufgrund der primären Fragestellung des Einflusses des kognitiven Stressors auf die muskulären Dysbalancen bewusst gewählt. Die körperliche Aufgabe sollte möglichst einfach sein und der kognitive Stressor möglichst schwierig, um die Wahrscheinlichkeit für Interferenzen auf motorischer und kognitiver Ebene zu erhöhen (Yogev-Seligmann et al., 2008). Zur Kontrolle der Vergleichbarkeit der Belastungen in der jeweiligen Single- sowie der Dual-Task-Bedingung wurde die subjektive Beanspruchung mit dem NASA-TLX überprüft. Dies ergab, wie oben beschrieben, auf subjektiver Ebene eine vergleichbare Beanspruchung für die beiden Bedingungen mit körperlicher Belastung. Auf der Subskala der geistigen Beanspruchung war in der Dual-Task-Bedingung eine höhere Beanspruchung feststellbar als in der kognitiven Single-Task-Bedingung und damit eine unterschiedliche geistige Beanspruchung auf subjektiver Ebene. Jedoch ist beim Einsatz der NASA-TLX Skalen davon auszugehen, dass die erbrachte Aufgabenleistung die subjektive Einschätzung beeinflusst (Annett, 2002) und damit die geringere kognitive Leistung in der Dual-Task-Bedingung subjektiv zu höherer geistiger Beanspruchung führte.

Eine erste Validierung des Parameters der dynamischen Dysbalancen ist in dieser Studie gelungen. Es zeigte sich eine diskriminante Validität zum Parameter der statischen Dysbalancen. Folgestudien sollten weitere Ergebnisse zur konvergenten und diskriminanten Validität, beispielsweise der posturalen Kontrolle und propriozeptiver Fähigkeiten, generieren. In

dieser Studie wurde eine Bewegung mit wenigen Freiheitsgraden für die Teilnehmer gewählt, um die Einflüsse des kognitiven Stressors möglichst exakt messen zu können. Trotz der eng definierten Rahmenbedingungen waren Veränderungen der Bewegung im Hinblick auf Geschwindigkeit und aufgebrauchte Kräfte an den Umkehrstellen der Bewegung beobachtbar (Suess, 2019). Für eine höhere ökologische Validität könnten bei weiteren Studien zur Reaktivität von Bewegungsparametern alltagsnähere Bewegungen zugrunde gelegt werden.

Bei der Untersuchung von Geschlechtsunterschieden lagen, vor allem aufgrund technischer Probleme, unterschiedliche Gruppengrößen zugrunde. Zwar wurde die ungleiche Varianz der beiden Gruppen in der Folge berücksichtigt, dennoch muss hier von einer eingeschränkten Interpretierbarkeit ausgegangen werden. Eine weitere methodische Einschränkung betrifft die Durchführung von Clusteranalysen. Der subjektive Schritt der Festlegung der Clusteranzahl aufgrund der visuellen Inspektion kann kritisch eingeordnet werden. Dies entspricht zwar dem üblichen Vorgehen, dennoch müssen die gefundenen Muster in weiteren Studien validiert und repliziert werden.

Zusammenfassung

Mit der zweiten Studie sollten die Auswirkungen eines kognitiven Stressors während einer einfachen motorischen Aufgabe und damit einer höheren physikalischen Anforderung als in Studie 1 untersucht werden. Dabei wurden sowohl statische als auch dynamische muskuläre Dysbalancen sowie die Bewegungsgeschwindigkeit und die kognitive Leistung berücksichtigt. Es zeigte sich, dass diese kognitiv-motorische Doppelaufgabe, unabhängig vom Geschlecht, im Mittel die absoluten statischen Dysbalancen erhöhte. Auch Belastungswechsel von der einen Seite der Wirbelsäule zur anderen nahmen in der Dual-Task-Bedingung zu, jedoch nur im oberen Bereich des Rückens. Sowohl auf muskulärer als auch kognitiver Ebene waren in der Doppelaufgabe Dual-Task-Kosten feststellbar. Außerdem trat im Mittel eine höhere Bewegungsgeschwindigkeit auf. Eine negative Korrelation der Reaktivitäten der Geschwindigkeit und der kognitiven Leistung lässt schlussfolgern, dass Priorisierungen zugunsten der Bewegung oder der kognitiven Leistung stattgefunden haben. Auf der Grundlage dieser statischen Dysbalancen ließen sich zwei Reaktivitätsmuster der Muskelaktivierung unter kognitivem Stress in einer dynamischen Belastungssituation identifizieren. Während ca. zwei Drittel der Teilnehmer mit einer mit einer Zunahme der dynamischer Dysbalancen und einer schnelleren Bewegungsgeschwindigkeit reagierten, zeichnete sich die motorische Kontrolle von ca. einem Drittel der Teilnehmer durch höhere statische Dysbalancen und langsameren

Bewegungen aus. Künftige prospektive Studien könnten das Risikopotenzial der identifizierten Muster für die Entstehung von Rückenbeschwerden evaluieren sowie weitere Studien mit alltagsnahen Bewegungen die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse beispielsweise auf das Arbeitsleben untersuchen.

7. Studie 3

Nachdem muskuläre Dysbalancen sowohl in einer statischen als auch einer dynamischen körperlichen Belastung unter kurzfristig wirksamen Stressoren bei gesunden Teilnehmern systematisch untersucht wurden, diente die dritte Studie dazu, die Ausprägungen und Stressreaktivitäten der muskulären Dysbalancen bei gesunden Teilnehmer und Rückenschmerzpatienten zu vergleichen. Zusätzlich wurden die psychologischen Variablen der Ängstlichkeit, Depressivität und Selbstwirksamkeit hinsichtlich ihres Einflusses auf die muskuläre Stressreaktivität betrachtet.

Muskuläre Dysbalancen werden als mitverantwortlich für die Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden angesehen oder auch als muskuläre Reaktion auf Schmerzen verstanden (Cram & Steger, 1983; Granata & Marras, 2000; van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003), deshalb sind diese primär in Bereichen der Schmerzlokalisation zu erwarten. Sowohl während des Stehens (Hoyt et al., 1981) als auch während des Sitzens (Triano & Luttges, 1985) konnten höhere statische muskuläre Dysbalancen im Lumbalbereich bei Rückenschmerzpatienten mit Schmerzlokalisation im unteren Rücken beobachtet werden. Häufig sind bei Rückenschmerzpatienten aber auch Muster einer darüber hinaus beeinträchtigten motorischen Kontrolle zu beobachten (Brumagne et al., 2019), wie etwa eine geringere posturale Stabilität (Luoto et al., 1996; Mazaheri et al., 2013; Nies & Sinnott, 1991). Wir gehen davon aus, dass der Parameter der dynamischen Dysbalancen dies zumindest teilweise widerspiegelt und sich dies insbesondere im oberen Rücken manifestiert. So sollten sich bei Patienten in der Baseline-Bedingung höhere statische muskuläre Dysbalancen im unteren Rücken und mehr dynamische Dysbalancen im oberen Rücken im Vergleich zu gesunden Teilnehmern beobachten lassen (**Hypothese 1**). Bislang nicht systematisch untersucht ist die Veränderung der statischen Dysbalancen unter kurzfristig wirksamen Stressoren von Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmer im Vergleich. Jedoch wurden unter kurzfristig wirksamen Stressoren Zunahmen der allgemeinen Muskelaktivierung von der Baseline zu den Stressbedingungen nachgewiesen (Burns, 2006a; Flor et al., 1985; Glombiewski et al., 2008). Darüber hinaus war bei Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern unter kognitiv-motorischen Dual-Task-Bedingungen mit einfachen posturalen Aufgaben und schwierigen kognitiven Aufgaben eine beeinträchtigte posturale Haltungskontrolle beobachtbar (Mazaheri et al., 2010; Sherfat et al., 2014; van Diele et al., 2010). So wird postuliert, dass ein kognitiver Stressor bei beiden Gruppen zu einer

Erhöhung sowohl der statischen als auch der dynamischen muskulären Dysbalancen im unteren und oberen Bereich des Rückens führt (**Hypothese 2**).

Rückenschmerzpatienten zeigen meist eine höhere muskuläre Reaktivität auf kurzfristig wirksame Stressoren, insbesondere im unteren Bereich des Rückens (Burns, 2006a; Flor et al., 1985; Glombiewski et al., 2008). Darüber hinaus lässt sich hinsichtlich der Reaktivität auf der Ebene weiterer Parameter der motorischen Kontrolle wie der posturalen Kontrolle häufig eine ausgeprägtere Beeinträchtigung feststellen (Mazaheri et al., 2013). Ausgehend von diesen Erkenntnissen sollten Rückenschmerzpatienten eine höhere Reaktivität hinsichtlich der statischen muskulären Dysbalancen im unteren Rücken aufweisen sowie im oberen Bereich des Rückens eine deutlichere Zunahme dynamischer Dysbalancen erfolgen (**Hypothese 3**).

Chronische Rückenschmerzpatienten weisen eine hohe interindividuelle Variabilität hinsichtlich der muskulären Reaktivität unter Stress auf. Diese Effekte können teilweise über den moderierenden Effekt von psychologischen Variablen erklärt werden, so liegen für die allgemeine Muskelaktivierung unter Stress für die Variablen der Depressivität und Ängstlichkeit bestätigende Befunde vor (Flor et al., 1985). Diese Effekte traten bei gesunden Teilnehmern nicht auf. Die Variable der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartungen wurde nach unserem Kenntnisstand noch nicht im Kontext der muskulären Stressreaktivität untersucht, jedoch liegen Befunde vor, dass Rückenschmerzpatienten mit höheren Selbstwirksamkeitserwartungen eine geringere Muskelaktivierung aufweisen (Lewis et al., 2012). Hinsichtlich weiterer Parameter der motorischen Kontrolle kann für die Variable der Ängstlichkeit und der posturalen Kontrolle bei Rückenschmerzpatienten auf erste Erkenntnisse verwiesen werden (Shanbehzadeh et al., 2018). Auf der Grundlage dieser Ergebnisse und des bekannten, deutlichen Einflusses dieser psychologischen Variablen auf den Prozess der Chronifizierung von Rückenschmerzen (Del Campo et al., 2017; Hasenbring et al., 2017; Linton, 2000) wird im Kontext eines transaktionalen Stressverständnisses (Everly & Lating, 2019; Lazarus & Folkman, 1986) davon ausgegangen, dass sich ein Einfluss der Variablen der Ängstlichkeit, Selbstwirksamkeit und Depressivität im Hinblick auf die muskuläre Stressreaktivität bei statischen und dynamischen Dysbalancen bei Rückenschmerzpatienten, nicht jedoch bei gesunden Teilnehmern, zeigt und ein funktionaler Zusammenhang zwischen diesen besteht. Während sich für Ängstlichkeit und Depressivität positive Zusammenhänge zeigen sollten, wird für die Variable der Selbstwirksamkeit ein negativer Zusammenhang postuliert (**Hypothese 4**).

7.1 Methode

7.1.1 Stichprobe

Die Stichprobe der dritten Studie bestand aus 36 gesunden Teilnehmern ohne muskuloskelettale Vorerkrankung (18 Frauen und 18 Männer) und 34 Rückenschmerzpatienten (23 Frauen und 11 Männer), die an einer ambulanten Rehabilitationsmaßnahme aufgrund von Rückenschmerzen teilnahmen. Folgende Ausschlusskriterien galten für alle Teilnehmer: a) eine psychiatrische oder neurologische Erkrankung; b) eine schlechte Schlafqualität in den vorangegangenen 24 Stunden, c) ein aktuelles Stressniveau höher als „mittel“ sowie d) die Einnahme von Medikamenten, welche die physiologische Stressantwort beeinflussen könnten. Ein weiteres Ausschlusskriterium für die gesunde Teilstichprobe war das Auftreten von Rückenbeschwerden im Jahr vor der Datenerhebung. In die Studie wurden Rückenschmerzpatienten aufgenommen, die vor Beginn der Behandlung an chronischen nichtspezifischen Rückenschmerzen litten, die länger als drei Monate auftraten. Der behandelnde Physiotherapeut beurteilte dies anhand der vorliegenden ärztlichen Verordnung, der Patientendaten und einer weitergehenden Befragung der Patienten. Bei unsicherer Datenlage wurden die Teilnehmer ausgeschlossen. Darüber hinaus sollten die Teilnehmer am Tag der Datenerhebung schmerzfrei sein, um Veränderungen der Muskelaktivierung auf den kognitiven Stressor und nicht auf das Schmerzerleben zurückführen zu können (Salavati et al., 2009). Alle Patienten gaben als Hauptschmerzlokalisation den unteren Rücken, 13 % zusätzlich den Nacken- und Schulterbereich und 12 % den Brustwirbelbereich an. Diese Angabe erfolgte im Vorfeld der Datenerhebung anhand einer subjektiven Einschätzung mithilfe einer Schmerzzeichnung (Ransford et al., 1976). Von den gesunden Teilnehmern waren 31 Rechts- und 5 Linkshänder, von den Patienten 32 Rechts- und 2 Linkshänder. Jede Person wurde einzeln getestet.

7.1.2 Versuchsablauf und experimentelle Bedingungen

Die gesunden Teilnehmer wurden in einem geräuscharmen Labor untersucht, dessen Raumtemperatur konstant auf ca. 22°C gehalten wurde. Die Datenerhebung der Rückenschmerzpatienten fand in einem separaten, geräuscharmen Raum einer Praxis für ambulante Rehabilitationsmaßnahmen statt. Auch hier wurde die Raumtemperatur bei ca. 22°C gehalten. Die Gesamtdauer der Datenerhebung betrug je Proband eine Stunde.

Ca. zwei Wochen vor der Datenerhebung wurden die Teilnehmer zu den Zielen und

dem allgemeinen Ablauf der Datenerhebung schriftlich und mündlich informiert. Die Rückenschmerzpatienten wurden darüber hinaus gebeten, ihre Hauptschmerzlokalisierung in eine Schmerzzeichnung einzutragen. Zu Beginn der eigentlichen Datenerhebung wurden die Versuchspersonen nochmals zum Ablauf informiert. Bevor die Sensoren zur Messung der Muskelaktivität am Rücken und zur Messung der elektrodermalen Aktivität an der Handinnenfläche angebracht wurden, füllten die Teilnehmer den Anamnesebogen, wie im allgemeinen Methodenteil beschrieben, aus. Danach bearbeiteten sie den Trait-Bogen des STAI (Laux et al., 1981), die Skala zur Allgemeine Selbstwirksamkeitsskala (SWE, Schwarzer & Jerusalem, 1999) und die Kurzform der Allgemeinen Depressionsskala (ADS-K, Hautzinger et al., 2012). Die Fragebögen wurden randomisiert dargeboten. Als nächstes wurden die Versuchspersonen mit dem kognitiven Stressor, der im allgemeinen Methodenteil beschriebenen PASAT-Aufgabe, vertraut gemacht, um Neuheitseffekte während des Experiments zu reduzieren. Der Stressor wurde erklärt und mithilfe einer Übungsaufgabe eingeübt, um sicherzustellen, dass die Teilnehmer die Aufgabe verstanden hatten. In der Folge wurden anthropometrische Daten erhoben und die Sensoren befestigt. Die Teilnehmer setzten sich wie in Studie 1 auf einen höhenverstellbaren Bürostuhl ohne Rollen, dessen Rückenlehne und Sitzfläche arretiert waren. In einer dreiminütigen Ruhephase wurden die Teilnehmer instruiert, sich bei geöffneten Augen zu entspannen und eventuell vorhandene Muskelanspannung zu lösen. Als nächstes erfolgte eine Baseline-Erhebung von vier Minuten sowie im Anschluss daran, für zweieinhalb Minuten, der kognitive Stressor. Nach diesem füllten die Teilnehmer den NASA-TLX aus. Um Ermüdungseffekte der Muskulatur zu vermeiden, wurden die Teilnehmer angehalten, sich nach der Ruhephase und der Baseline-Erhebung zurückgelehnt an der Stuhllehne auszuruhen.

7.1.3 Instrumente, Messungen und Datenanalyse

Elektromyographische und elektrodermale Aktivität

Die elektromyographische Aktivität wurde wie im allgemeinen Methodenteil beschrieben erfasst und entsprechend des Vorgehens bei Studie 1 für die Baseline-Bedingung und die Stressbedingung ausgewertet. Zusätzlich zu den statischen Dysbalancen wurden die dynamischen Dysbalancen, wie in Studie 2 beschrieben, bestimmt. Sowohl für die statischen als auch die dynamischen Dysbalancen wurden aus den Werten der einzelnen Muskelpaare jeweils ein Wert für den oberen und für den unteren Rücken sowie ein Gesamtwert für den gesamten Bereich des Rückens berechnet. Hinsichtlich der statischen Dysbalancen erfolgte dies durch eine Mittelung der Dysbalancen der drei gemessenen Muskelpaare des Trapezmuskels für den

oberen Rückenbereich und eine Mittelung der Dysbalancen der drei Muskelpaare im unteren Rückenbereich. In Bezug auf die dynamischen Dysbalancen wurde der Wert für den oberen Rücken und unteren Rücken durch das Aufsummieren der Auftretenshäufigkeit der Belastungswechsel in den jeweiligen Muskelpaaren pro Bedingung berechnet. Die Erfassung und Auswertung der elektrodermalen Aktivität erfolgte wie im allgemeinen Methodenteil ausgeführt.

Fragebögen und Skalen

Wie beschrieben, wurde vor dem Anbringen der Sensoren der allgemeine Fragebogen zur Erhebung demographischer Daten und zur Anamnese, der Trait-Bogen des STAI, die SWE und der ADS-K von den Teilnehmern ausgefüllt. Nach dem kognitiven Stressor wurde die subjektive Beanspruchung mit dem NASA-TLX, wie in Studie 2 dokumentiert, erhoben. Die Auswertung der Fragebögen erfolgte entsprechend der jeweiligen Manuale. Die bisher nicht eingesetzten Verfahren, die Skala zur Allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung und die Allgemeine Depressionsskala, werden im Folgenden beschrieben.

Mit der Skala zur Allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung (SWE) von Schwarzer und Jerusalem (1999) liegt ein ökonomisches und etabliertes Instrument zur Erfassung individueller Kompetenzerwartungen, mit Schwierigkeiten und Hindernissen im täglichen Leben umgehen zu können, vor. Die Skala kann sowohl bei Jugendlichen als auch bei Erwachsenen eingesetzt werden. Bei der eindimensionalen Skala handelt sich um ein Selbstbeurteilungsverfahren mit 10 Items. Das Antwortformat ist vierstufig, wobei 1 „trifft nicht zu“ und 4 „trifft genau zu“ entspricht. Der Skalenwert entspricht der Summe aller Antwortwerte und kann somit insgesamt Werte zwischen 10 und 40 annehmen. Die psychometrischen Kennwerte sind als sehr gut einzuschätzen. Mehrere Studien konnten eine hohe interne Konsistenz mit Cronbachs Alpha zwischen $\alpha = .80$ und $\alpha = .90$ nachweisen (Schwarzer & Jerusalem, 1999). Mittels konfirmatorischer Faktorenanalyse ließ sich die Eindimensionalität des Konstruktes belegen (Scholz et al., 2002). Die Skala zur Allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung zeigt eine hohe konvergente Validität von $r = .55$ mit Konstrukten wie Optimismus und eine divergente Validität von $r = -.60$ mit Ängstlichkeit und von $r = -.52$ mit Depressivität (Schwarzer et al., 1997).

Die Allgemeine Depressionsskala (ADS) stellt eine deutsche Adaptation der *Center for Epidemiological Studies – Depression Scale* (CES-D) von Radloff (1977) dar. Aktuell liegt die ADS in einer zweiten überarbeiteten und neu normierten Form vor (Hautzinger et al., 2012). Die ADS wurde als Instrument zum Screening depressiver Symptomatik bei epidemiologischen

Studien in der Allgemeinbevölkerung im Altersbereich von 14 bis 80 Jahren konzipiert. Neben der in dieser Untersuchung verwendeten Kurzform (ADS-K) mit 15 Items liegt auch eine Langform (ADS-L) mit 20 Items vor. Bei der Kurzform wurden wenig trennscharfe Items der Langform ausgeschlossen (Hautzinger & Bailer, 1993). Mithilfe einfacher Äußerungen wird anhand einer Selbstbeurteilung das aktuelle Vorhandensein und die Dauer von Beeinträchtigungen auf emotionaler, motivationaler, kognitiver, somatischer und motorischer/interaktionaler Ebene eingeschätzt und auf einer vierstufigen Skala von 0 = „selten oder überhaupt nicht“ (weniger als ein Tag) bis 3 = „meistens, die ganze Zeit“ (5 bis 7 Tage lang) die Auftretenshäufigkeit einzelner depressiver Symptome abgefragt. Entsprechend der Antwortvorgabe ergibt sich für die ADS-K daraus ein Summenwert, der zwischen einem Minimum von 0 und einem Maximum von 45 liegt. Gesunde Personen erreichen im Mittel Werte zwischen 6.9 und 11.7 Punkten, wobei Frauen durchwegs höhere Werte aufweisen. Bei einem kritischen Grenzwert von > 17 Punkten beim ADS-K können mit hoher Sensitivität und Spezifität Frauen und Männer mit depressiven Auffälligkeiten, die im klinischen Bereich liegen, identifiziert werden (Lehr et al., 2008). Im Bereich der Gütekriterien existieren zur Bestimmung der Reliabilität Berechnungen der inneren Konsistenz für zwei Bevölkerungsstichproben, wobei ein Cronbachs Alpha von .88 bis .95 als hohe innere Konsistenz anzusehen ist (Hautzinger et al., 2012). Studien zur Konstruktvalidität bestätigen die Eindimensionalität des Konstrukts und damit die Plausibilität der Interpretation des Summenwertes (Lehr et al., 2008). Durchweg hohe bis sehr hohe Zusammenhänge mit konstruktnahen Instrumenten geben Hinweise zur konvergenten Validität in Bezug auf Depressivität. So korrelierte beispielsweise die ADS-K mit der Befindlichkeitsskala (Bf-S, (von Zerssen, 1976) mit $r = .73$ (Hautzinger et al., 2012). Zusammenfassend können die ADS-L und ADS-K so als zuverlässiges und gültiges Instrument zur Messung der Depressivität eingeordnet werden.

7.1.4 Statistische Auswertung

Zur Berechnung von Unterschieden zu demographischen und anthropometrischen Daten der Versuchspersonen sowie zu den Werten aus den psychologischen Fragebögen zu Beginn der Datenerhebung wurde eine multivariaten Varianzanalyse mit den abhängigen Variablen „Alter“, „BMI“, „Ängstlichkeit“, „Selbstwirksamkeit“ und „Depressivität“ sowie der unabhängigen Variable „Gesundheitszustand“ angewandt. In Bezug auf die elektrodermale Aktivität sowie den statischen und dynamischen Dysbalancen wurde eine multivariate Kovari-

anzanalyse mit den unabhängigen Variablen „Gesundheitszustand“ (gesunde Teilnehmer, Rückenschmerzpatienten) und „Bedingung“ (Baseline, PASAT-Aufgabe) und der Variable „Alter“ als Kovariate berechnet. Als abhängige Variablen wurden die NS.SCR freq., der SCL sowie die statischen und dynamischen muskulären Dysbalancen im oberen und unteren Rücken berücksichtigt. In einem weiteren Schritt wurden einfaktoriellen Kovarianzanalysen für jede abhängige Variable unter Berücksichtigung des Alters als Kovariate durchgeführt. Hierfür wurde das Alphaniveau mithilfe der Bonferroni-Korrektur auf $p < .008$ angepasst. Zusammenhänge zwischen den psychologischen Variablen der Ängstlichkeit, der Depressivität sowie den Selbstwirksamkeitserwartung und der muskulären Stressreaktivität wurden mit der Produkt-Moment-Korrelation von Pearson berechnet. Das Alphaniveau wurde nach der Methode von Bonferroni auf $p < .0025$ korrigiert. Die muskuläre Stressreaktivität wurde aus Differenzen der Werte der Stressbedingung und der Baseline-Bedingung gebildet. Hierfür wurden die absoluten statischen Dysbalancen der einzelnen Muskelpaare über den gesamten Rücken hinweg je Bedingung gemittelt und auch für die dynamischen Dysbalancen, durch Aufsummieren der muskulären Belastungswechsel, ein Wert je Bedingung für den gesamten Rücken gebildet. Bei nachgewiesenen linearen Zusammenhängen wurde in einem weiteren Schritt die Stärke ihres Einflusses auf die muskulären Stressreaktivitäten mit einer schrittweisen linearen Regressionsanalyse beziehungsweise einer einfachen linearen Regression überprüft. Zur Überprüfung der Voraussetzungen wurden die Residuen mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung, mit der Durbin-Watson-Statistik auf Unabhängigkeit sowie durch visuelle Inspektion die Homoskedastizität überprüft. Darüber hinaus wurden die Daten auf vorliegende Extremwerte und die Prädiktoren mit dem VIF (variance influence factor) -Wert auf Multikollinearität hin überprüft. Effektstärken werden bei Varianzanalysen mit η_p^2 , bei t-Tests mit d , bei Korrelationen mit dem Korrelationskoeffizienten r und bei Regressionsanalysen mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben.

7.2 Ergebnisse

7.2.1 *Demographische Variablen, Ängstlichkeit, Depressivität und Selbstwirksamkeit*

Der BMI der gesunden Teilnehmer ($M = 23.08$, $SD = 3.19$, 95% KI [22.00, 24.16]) und der Rückenschmerzpatienten ($M = 24.04$, $SD = 3.76$, 95% KI [22.68, 25.39]) unterschied sich nicht, $F(1, 67) = 1.15$, $p = .29$, jedoch unterschieden sich die beiden Teilstichproben signifikant

hinsichtlich des Alters, $F(1, 67) = 64.00$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .49$. Während die gesunden Teilnehmer ein mittleres Alter von 22.39 Jahren ($SD = 2.30$, 95% KI [21.61, 23.17]) aufwiesen, betrug es bei den Rückenschmerzpatienten 41.19 Jahre ($SD = 14.01$, 95% KI [36.14, 46.24]). In Bezug auf die psychologischen Variablen Ängstlichkeit, Depressivität und Selbstwirksamkeit zeigten die beiden Teilstichproben keine Unterschiede vor der Datenerhebung. Die gesunden Teilnehmer schätzten ihre Ängstlichkeit im Mittel mit einem Wert von 37.25 ($SD = 9.00$, 95% KI [34.20, 40.30]) und die Rückenschmerzpatienten im Mittel mit einem Wert von 35.72 ($SD = 7.64$, 95% KI [32.96, 38.47]) und damit vergleichbar ein, $F(1, 67) = 0.66$, $p = .42$. Die Depressivitätswerte der Gesunden ($M = 8.61$, $SD = 6.50$, 95% KI [6.41, 10.81]) und der Rückenschmerzpatienten ($M = 8.22$, $SD = 6.25$, 95% KI [5.96, 10.47]) unterschieden sich nicht, $F(1, 66) = 0.064$, $p = .80$, ebenso wenig die Werte hinsichtlich der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung (Gesunde: $M = 30.61$, $SD = 3.42$, 95% KI [29.45, 31.77]; Rückenschmerzpatienten: $M = 31.72$, $SD = 3.67$, 95% KI [30.40, 33.04]), $F(1, 67) = 1.33$, $p = .25$.

7.2.2 Manipulationsüberprüfung

Die Effektivität der Stressinduktion wurde sowohl mit zwei Parametern der elektrodermalen Aktivität, der NS.SCR freq. und dem SCL, sowie durch eine subjektive Einschätzung der Beanspruchung mit dem NASA-TLX überprüft.

Elektrodermale Aktivität

Eine multivariate Kovarianzanalyse mit den abhängigen Variablen der NS.SCR freq. und des SCL ergab unter Berücksichtigung der Variable „Alter“ einen signifikanten Effekt hinsichtlich des Faktors „Bedingung“, $F(2, 134) = 182.12$, $p < .001$, Wilks' $\Lambda = .269$, $\eta_p^2 = .73$ und auch hinsichtlich des Faktors „Gesundheit“ $F(2, 134) = 6.80$, $p = .002$, Wilks' $\Lambda = .908$, $\eta_p^2 = .09$. Die Interaktion aus „Bedingung“ und „Gesundheit“ wurde nicht signifikant, $F(2, 134) = 1.05$, $p = .90$, Wilks' $\Lambda = .998$. Im Folgenden durchgeführte univariate Kovarianzanalysen wiesen in Bezug auf die NS.SCR freq. für den Faktor „Bedingung“ (Baseline, kognitiver Stressor), $F(1, 135) = 49.61$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .27$, und den Faktor „Gesundheitszustand“ (gesunde Teilnehmer, Rückenschmerzpatienten), $F(1, 135) = 9.74$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .07$, signifikante Effekte auf. Die PASAT-Aufgabe ($M = 17.91$, $SD = 9.41$, 95% KI [15.75, 20.07]) führte zu einem Anstieg im Vergleich zur Baseline-Bedingung ($M = 7.98$, $SD = 7.63$, 95% KI [6.31, 9.76]). Die gesunden Teilnehmer zeigten im Mittel 10.95 NS.SCR freq. ($SD = 9.86$, 95% KI [8.47, 13.43]), die Rückenschmerzpatienten

im Mittel 15.06 NS.SCR freq. ($SD = 9.54$, 95% KI [12.51, 17.61]). Die Interaktion aus „Bedingung*Gesundheitszustand“ wurde nicht signifikant, $F(1, 135) = 0.01$, $p = .97$. Auch für den SCL zeigte sich ein signifikanter Effekt des Faktors „Bedingung“ $F(1, 135) = 311.64$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = .70$, nicht jedoch für den Faktor „Gesundheitszustand“, $F(1, 135) = 4.25$, $p = .06$, $\eta_p^2 = .02$. Der SCL stieg von der Baseline-Bedingung ($M = 0.17$, $SD = 0.16$, 95% KI [0.13, 0.20]) zur PASAT-Aufgabe an ($M = 0.68$, $SD = 0.19$, 95% KI [0.63, 0.72]). Auch für die Variable des SCL wurde die Interaktion aus „Bedingung*Gesundheitszustand“ nicht signifikant.

Subjektive Einschätzung der Beanspruchung

Bezüglich der subjektiven Beanspruchung zeigte sich in der Einschätzung zur PASAT-Aufgabe für den Gesamtwert des NASA-TLX kein Unterschied zwischen den gesunden Teilnehmern ($M = 57.90$, $SD = 11.38$, 95% KI [54.05, 61.75]) und den Rückenschmerzpatienten ($M = 51.00$, $SD = 17.55$, 95% KI [44.88, 57.12]), $F(1, 68) = 3.86$, $p = .06$.

7.2.3 Statische und dynamische muskuläre Dysbalancen

Statische muskuläre Dysbalancen

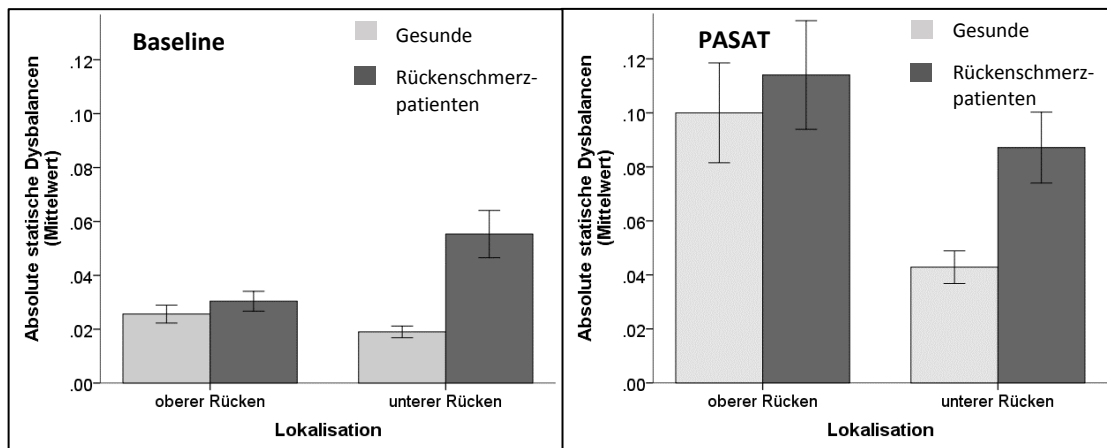
Eine multivariate Kovarianzanalyse mit der Variable „Alter“ als Kovariate und den unabhängigen Variablen „statische Dysbalancen im oberen Rücken“ und „statische Dysbalancen im unteren Rücken“ ergab einen signifikanten Effekt für den Faktor „Bedingung“, $F(2, 134) = 16.78$, $p < .001$, Wilks' $\Lambda = .800$, $\eta_p^2 = .20$, und den Faktor „Gesundheit“, $F(2, 134) = 11.83$, $p < .001$, Wilks' $\Lambda = .850$, $\eta_p^2 = .15$. Die Interaktion „Bedingung*Gesundheit“ wurde nicht signifikant, $F(2, 134) = 0.13$, $p = .88$, Wilks' $\Lambda = .998$, siehe Abbildung 6.

Der signifikante Effekt für den Faktor „Bedingung“ ergab sich aus höheren Dysbalancen in der Stressbedingung im Vergleich zur Baseline-Bedingung, sowohl im oberen Rücken, $F(1, 135) = 30.52$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .18$, als auch im unteren Rücken, $F(1, 135) = 10.36$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .08$. So traten im oberen Rücken in der Baseline-Bedingung statische Dysbalancen im Mittel von 0.03 ($SD = 0.02$, 95% KI [0.02, 0.03]) auf und in der Stressbedingung von 0.11 ($SD = 0.12$, 95% KI [0.08, 0.13]). Im unteren Rücken wiesen die Teilnehmer in der Baseline eine mittlere statische Dysbalance von 0.04 ($SD = 0.04$, 95% KI [0.03, 0.05]) und in der Stressbedingung von 0.06 ($SD = 0.07$, 95% KI [0.05, 0.08]) auf. Hinsichtlich des Faktors „Gesundheit“ zeigten sich für gesunde Teilnehmer ($M = 0.06$, $SD = 0.09$, 95% KI [0.04, 0.08]) und Rückenschmerzpatienten ($M = 0.07$, $SD = 0.10$, 95% KI [0.05, 0.10]) vergleichbare statische Dysbalancen im oberen Rücken, $F(1, 135) = 1.20$, $p = .28$. Im unteren Rücken waren jedoch signifikante Unterschiede

zu beobachten (gesunde Teilnehmer: $M = 0.03$, $SD = 0.03$, 95% KI [0.02, 0.04], Rückenschmerzpatienten: $M = 0.07$, $SD = 0.07$, 95% KI [0.05, 0.09]), $F(1, 135) = 23.79$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .15$.

Abbildung 6

Mittlere statische Dysbalancen je Bedingung für gesunde Teilnehmer und Rückenschmerzpatienten



Anmerkung. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

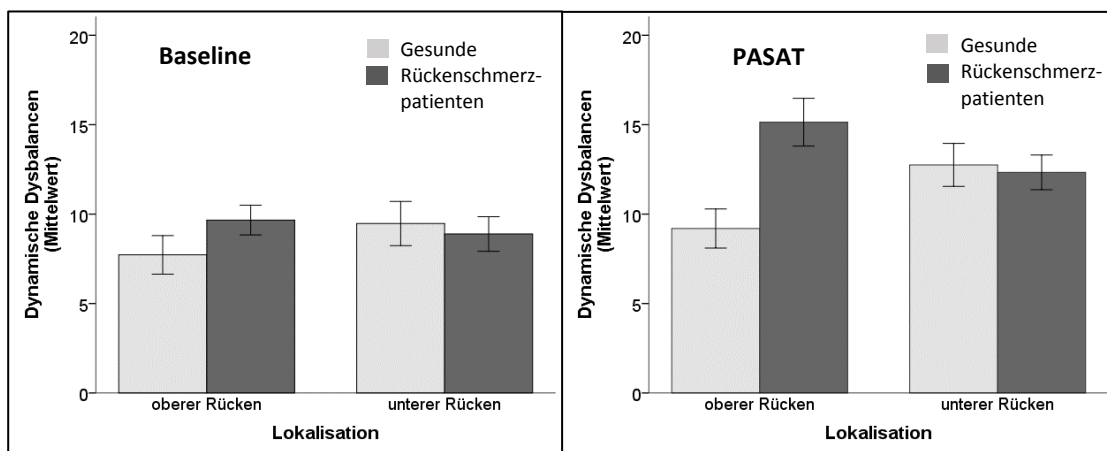
Dynamische muskuläre Dysbalancen

Die Berechnung der dynamischen Dysbalancen mithilfe einer multivariaten Kovarianzanalyse ergab unter Berücksichtigung des Alters signifikante Effekte für den Faktor „Bedingung“, $F(2, 135) = 11.11$, $p < .001$, Wilks' $\Lambda = .859$, $\eta_p^2 = .14$ sowie den Faktor „Gesundheit“, $F(2, 135) = 11.57$, $p < .001$, Wilks' $\Lambda = .854$, $\eta_p^2 = .15$. Außerdem zeigte sich eine signifikante Interaktion von „Gesundheit“ und „Bedingung“, $F(2, 135) = 4.06$, $p = .02$, Wilks' $\Lambda = .943$, $\eta_p^2 = .06$, siehe Abbildung 7. Der Haupteffekt des Faktors „Bedingung“ äußerte sich in höheren dynamischen Dysbalancen während der PASAT-Aufgabe als während der Baseline-Bedingung sowohl im oberen Rücken ($M_{PASAT} = 13.39$, $SD = 8.44$, 95% KI [11.82, 14.96], $M_{Baseline} = 8.74$, $SD = 5.86$, 95% KI [8.02, 11.51]), $F(1, 136) = 17.20$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .11$, als auch im unteren Rücken ($M_{PASAT} = 12.76$, $SD = 6.62$, 95% KI [11.17, 14.35], $M_{Baseline} = 9.21$, $SD = 6.72$, 95% KI [7.62, 10.79]) $= 9.78$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .07$. In Bezug auf den Effekt des Faktors „Gesundheit“ zeigten Rückenschmerzpatienten im oberen Rücken ($M = 13.68$, $SD = 7.76$, 95% KI [12.09, 15.27]) signifikant mehr dynamische Dysbalancen als gesunde Teilnehmer ($M = 8.46$, $SD = 6.52$, 95% KI [6.91, 10.00]), $F(1, 136) = 21.67$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .14$. Im unteren Rücken unterschieden sich die dyna-

mischen Dysbalancen der beiden Teilstichproben nicht, $F(1, 136) = 0.05$, $p = .82$. Der Interaktionseffekt „Bedingung*Gesundheit“ zeigte sich für die dynamischen Dysbalancen im oberen Rückenbereich, $F(1, 136) = 8.03$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .06$, nicht im unteren Rückenbereich, $F(1, 136) = 0.06$, $p = .81$. Während der Baseline-Bedingung unterschieden sich die dynamischen Dysbalancen der gesunden Teilnehmer ($M = 7.72$, $SD = 6.47$, 95% KI [5.53, 9.91]) und der Rückenschmerzpatienten ($M = 9.76$, $SD = 5.01$, 95% KI [8.02, 11.51]) nicht, $F(1, 67) = 3.56$, $p = .06$. Jedoch wiesen während der PASAT-Aufgabe die Rückenschmerzpatienten ($M = 15.15$, $SD = 8.27$, 95% KI [12.26, 18.03]) im oberen Rücken signifikant mehr dynamische Dysbalancen auf als die gesunden Teilnehmer ($M = 9.19$, $SD = 6.58$, 95% KI [6.97, 11.42]), $F(1, 67) = 11.18$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .14$. Bei den Rückenschmerzpatienten nahmen die dynamischen Dysbalancen im oberen Bereich des Rückens von der Baseline-Bedingung zur PASAT-Aufgabe zu, $F(1, 33) = 8.91$, $p = .005$, $\eta_p^2 = .21$, bei den gesunden Teilnehmern nicht, $F(1, 35) = 1.03$, $p = .32$.

Abbildung 7

Mittlere dynamische Dysbalancen je Bedingung für gesunde Teilnehmer und Rückenschmerzpatienten



Anmerkung. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

7.2.4 Korrelation und Regression: Psychologische Variablen und Stressreaktivität

Bei den gesunden Teilnehmern waren keine Zusammenhänge zwischen den psychologischen Variablen der Selbstwirksamkeit, der Ängstlichkeit sowie der Depressivität und der muskulären Stressreaktivität auf der Ebene statischen und dynamischen Dysbalancen feststell-

bar, für alle Korrelationen $p > 0.008$. Bei den Rückenschmerzpatienten ergaben sich Zusammenhänge zwischen der Reaktivität der statischen Dysbalancen für den gesamten Rücken und der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung ($r = -.51$, 95% KI $[-.75, -.22]$, $p = .001$) sowie der Depressivität ($r = .59$, 95% KI $[.36, .74]$, $p \leq .001$). Kein Zusammenhang zeigte sich zwischen der Reaktivität der statischen Dysbalancen und der Ängstlichkeit ($r = .15$, 95% KI $[-.19, .47]$, $p = .20$). Hinsichtlich der Reaktivität der dynamischen Dysbalancen ergab sich ein signifikanter Zusammenhang mit der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung ($r = -.43$, 95% KI $[-.70, -.09]$, $p = .005$), nicht jedoch mit der Ängstlichkeit ($r = .36$, 95% KI $[.01, .67]$, $p = .02$) und der Depressivität ($r = .24$, 95% KI $[-.18, .58]$, $p = .09$). Zur Überprüfung des Einflusses der Selbstwirksamkeitserwartung und der Depressivität auf die Stressreaktivität der statischen muskulären Dysbalancen wurde eine schrittweise lineare Regression gerechnet. Die Voraussetzungen für die Durchführung einer Regressionsanalyse waren gegeben. Es lagen keine Werte mit einer Standardabweichung ≥ 3 vor. Die Residuen waren gemäß dem Kolmogorov-Smirnov-Test normalverteilt, $p = .07$. Die Überprüfung der Unabhängigkeit der Residuen erfolgte mit der Durbin-Watson-Statistik, der resultierende Wert von 1.969 spricht für eine Unabhängigkeit. Die grafische Inspektion zur Homoskedastizität lässt auf Varianzgleichheit schließen und mit einem VIF-Wert von 1.098 ist nicht von einer Multikollinearität auszugehen. Das Ergebnis der schrittweisen Regressionsanalyse ergab, dass die beiden Prädiktoren 37.0 % der Varianz der muskulären Stressreaktivität aufklären konnten, $R^2 = 0.370$, $F(2, 31) = 9.11$, $p = 0.001$, siehe Tabelle 10.

Tabelle 10

Ergebnis des schrittweisen Regression zur Vorhersage der statischen Dysbalancen durch die allgemeine Selbstwirksamkeitserwartung und Depressivität

Prädiktor	Regressionskoeffizient	β	t	p
Selbstwirksamkeit	-0.17	-.420	-2.81	< .01
Depressivität	.009	.333	2.23	< .05

Die Stärke des Einflusses der Selbstwirksamkeitserwartung auf die dynamischen muskulären Dysbalancen wurde mit einer einfachen linearen Regression überprüft. Auch hier wa-

ren die Voraussetzungen für eine Berechnung gegeben. So waren keine Werte mit einer Standardabweichung ≥ 3 vorhanden und die Residuen waren gemäß dem Kolmogorov-Smirnov Test normalverteilt, $p = .14$. Bei der Überprüfung der Unabhängigkeit der Residuen mit der Durbin-Watson-Statistik ergab sich ein Wert von 1.944, der auf eine Unabhängigkeit schließen lässt. Auch die grafische Inspektion zur Homoskedastizität wies auf Varianzgleichheit hin. Die einfache lineare Regression zeigte, dass die Selbstwirksamkeitserwartung mit einem Regressionskoeffizienten von -1.097 einen signifikanten Prädiktor für die Reaktivität der dynamischen Dysbalancen darstellt, $t(32) = -2.66$, $p = .01$. 18.0% der Varianz der Reaktivität der dynamischen Dysbalancen konnten durch die Variable der Selbstwirksamkeitserwartung aufgeklärt werden, $R^2 = .180$, $F(1, 32) = 7.05$, $p = 0.01$.

7.3 Diskussion

In der dritten Studie sollten systematische Erkenntnisse darüber gewonnen werden, ob sich Rückenschmerzpatienten und gesunde Teilnehmer hinsichtlich der statischen und dynamischen muskulären Dysbalancen unterscheiden und inwiefern die muskuläre Stressreaktivität von den individuellen Variablen der Ängstlichkeit, Depressivität und Selbstwirksamkeit beeinflusst wird.

Hinsichtlich der statischen muskulären Dysbalancen zeigten Rückenschmerzpatienten während der Baseline-Bedingung höhere Ausprägungen als gesunde Teilnehmer. Für die dynamischen muskulären Dysbalancen waren jedoch keine Unterschiede zu beobachten. Somit konnte **Hypothese 1** für die Ausprägungen der statischen Dysbalancen bestätigt werden, nicht jedoch für die dynamischen Dysbalancen. Sowohl für die statischen als auch die dynamischen muskulären Dysbalancen waren im gesamten Bereich des Rückens Erhöhungen von der Baseline zur Stressbedingung bei beiden Teilnehmergruppen zu beobachten. Eine Ausnahme stellten die dynamischen Dysbalancen der gesunden Teilnehmer im oberen Bereich des Rückens dar. Dies kann größtenteils als Beleg für **Hypothese 2** gewertet werden. Während für die statischen Dysbalancen kein Unterschied in Bezug auf die muskuläre Stressreaktivität zwischen Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern im unteren Bereich des Rückens festzustellen war, nahmen die dynamischen Dysbalancen im oberen Bereich nur bei den Rückenschmerzpatienten zu, was **Hypothese 3** hinsichtlich der dynamischen Dysbalancen untermauert, nicht jedoch hinsichtlich der statischen Dysbalancen. Die muskuläre Stressreaktivität wurde bei den gesunden Teilnehmern nicht von den individuellen Variablen der Ängstlichkeit, Depressivität und Selbstwirksamkeit beeinflusst. Die allgemeine Selbstwirksamkeitserwartung

übte jedoch bei Rückenschmerzpatienten sowohl in Bezug auf die Höhe der statischen als auch die Häufigkeit der dynamischen Dysbalancen ein Einfluss aus. Zusätzlich zeigte sich dies für die statischen Dysbalancen auch für die Variable der Depressivität. Die Ängstlichkeit dagegen übte weder auf die Reaktivität auf der Ebene der statischen noch der dynamischen Dysbalancen einen Einfluss aus. Dies spricht in weiten Teilen für **Hypothese 4**.

Manipulationsüberprüfung

Die Ergebnisse auf der Ebene der elektrodermalen Aktivität sind aufgrund der Erhöhung von der Baseline-Bedingung zur Stressbedingung bei den Parametern der NS.SCR freq. und des SCL als Indiz für eine erfolgreiche Stressinduktion bei beiden Gruppen zu werten. Unter Berücksichtigung des Alters zeigten die Rückenschmerzpatienten unabhängig von den beiden Bedingungen mehr NS.SCR freq. als gesunde Teilnehmer. Für den Parameter des SCL war dieser Effekt nicht zu beobachten. Die nicht signifikanten Interaktionseffekte sprechen für gleichwertige Zunahmen beider Parameter von der Baseline-Bedingung zur PASAT-Aufgabe bei beiden Teilstichproben und damit für sich nicht unterscheidende Stressreaktivitäten auf der Ebene der elektrodermalen Aktivität. Die subjektive Einschätzung zur Gesamtbeanspruchung unterschied sich bei Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern nicht und die mittleren Werte sind vergleichbar mit den in anderen Studien gemessenen Beanspruchungen während kognitiver Aufgaben (Grier, 2015).

In mehreren Studien wurden bei Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern vergleichbare Werte während der Baseline-Erhebung und auch in Reaktion auf einen nicht schmerzinduzierenden Stressor hinsichtlich des SCL festgestellt (Collins et al., 1982; Flor et al., 1992; Flor & Turk, 1989; Sjörs et al., 2009). Dieser Effekt ist konsistent mit der These, dass sich Unterschiede in der autonomen Regulation bei Rückenschmerzpatienten insbesondere unter einer Schmerzinduktion zeigen, nicht jedoch bei anderen Reizen (Peters & Schmidt, 1991). Auch auf der Ebene des phasischen Parameters der NS.SCR freq. waren keine Unterschiede hinsichtlich der Stressreaktivität zu beobachten. Die unabhängig von der Bedingung gemessenen höheren Werte bei Rückenschmerzpatienten könnten jedoch auf eine erhöhte elektrodermale Labilität im Sinne einer Trait-Variable von Rückenschmerzpatienten hinweisen (Dawson et al., 2007; O'Gorman & Horneman, 1979). Es wird diskutiert, dass eine höhere elektrodermale Labilität möglicherweise als bestehende autonome Dysregulation die Entwicklung von Schmerzen begünstigt (Bonnet & Naveteur, 2004). Aufgrund der Schmerzfreiheit der

Patienten in unserer Studie sind die Unterschiede nicht auf aktuelles Schmerzerleben zurückzuführen.

Muskuläre Dysbalancen

Sowohl bei gesunden Teilnehmern als auch bei Rückenschmerzpatienten erhöhten sich die statischen muskulären Dysbalancen von der Baseline- zur Stressbedingung, wobei sich beide Teilstichproben nicht hinsichtlich ihrer Stressreaktivität unterschieden. Jedoch wiesen Rückenschmerzpatienten sowohl in der Baseline- als auch in der Stressbedingung im Bereich des unteren Rückens höhere statische muskuläre Dysbalancen auf als gesunde Teilnehmer. Im Bereich des oberen Rückens waren vergleichbare Werte zu beobachten.

Für die allgemeine Muskelaktivierung ohne Berücksichtigung von Seitenunterschieden liegen zum Vergleich von Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern inkonsistente Ergebnisse vor. Während Geisser et al. (2005) in einer Übersichtsarbeit schlussfolgern, dass Rückenschmerzpatienten unter statischen körperlichen Belastungen wie beim Sitzen und Stehen eine höhere Muskelaktivierung zeigen, gehen von Diëen et al. (2003) davon aus, dass bei Rückenschmerzpatienten sowohl eine höhere als auch eine niedrigere Muskelaktivierung auftreten kann. Höhere Werte können nach diesen Autoren entsprechend des *Pain-spasm-pain*-Modells (Travell et al., 1942) eingeordnet werden. Danach führt ein Schmerzreiz zu einer erhöhten Muskelaktivierung, die wiederum den Schmerz aufrechterhält. So ist von einer dauerhaft erhöhten Muskelaktivierung auszugehen, auch in Ruhebedingungen (van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003). Diese durch Schmerz ausgelösten Muster der Muskelaktivierung scheinen auch in schmerzfreien Phasen zu persistieren. So sind bei Rückenschmerzpatienten mit rezidivierenden Beschwerden auch während einer Remission unter Baseline-Bedingungen höhere Werte der Muskelaktivierung zu beobachten (L. H. Larsen et al., 2018). Das in unserer Studie festgestellte Muster einer grundlegend höheren asymmetrischen paraspinalen Aktivierung kann konsistent zu diesen Ergebnissen eingeordnet werden.

In die Interpretation dieser Ergebnisse sind die bei Rückenschmerzpatienten zu beobachtenden ausgeprägteren NS.SCR freq. auf der Ebene der elektrodermalen Aktivität mit einzubeziehen. Dies könnte, neben der oben erwähnten Interpretation als Traitmerkmal, auch auf ein insgesamt höheres Arousal in der Untersuchungssituation bei Rückenschmerzpatienten, einhergehend mit erhöhten muskulären Dysbalancen, hinweisen. Jedoch zeigten sich im Rahmen der Manipulationsüberprüfung diese Unterschiede nicht durchgängig. Weder die Ausprägungen des SCL, der die allgemeinen tonischen Veränderungen des autonomen

Arousal widerspiegelt (Dawson et al., 2007; Nagai et al., 2004), noch die subjektiven Beanspruchungsparameter geben Hinweise auf Unterschiede in der autonomen Aktivierung. Darüber hinaus wäre bei einem insgesamt höheren Arousal davon auszugehen, dass sich dies nicht nur in muskulären Aktivitätsunterschieden im unteren Rücken, sondern auch in dem insbesondere auf Arousal ansprechenden oberen Bereich des Rückens niederschlägt (Marker et al., 2017).

Vergleichbar zu anderen Studien (Glombiewski et al., 2008), welche die allgemeine Muskelaktivierung von Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern untersuchten, zeigten sich auch in Bezug auf die statischen muskulären Dysbalancen primär Unterschiede im unteren Bereich des Rückens. Aufgrund der Tatsache, dass der untere Rücken die Hauptschmerzlokalisation der Patientengruppe darstellte, könnte dies auf eine Symptomspezifität in Bezug auf statische muskuläre Dysbalancen hinweisen. Jedoch kann dies aufgrund des fehlenden Vergleichs mit Patienten, deren Schmerz hauptsächlich in anderen Bereichen des Rückens auftritt, nur mit Einschränkungen geschlussfolgert werden.

Der kognitive Stressor führte unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit zu höheren statischen Dysbalancen in beiden Rückenbereichen, wobei die muskuläre Reaktion auf diesen Stressor bei beiden Teilstichproben vergleichbar ausfiel. Somit konnte in unserer Studie für den Parameter der statischen muskulären Dysbalancen keine symptomspezifische Stressreaktivität beobachtet werden. Insofern unterscheiden sich diese Ergebnisse von Studien, bei denen die Annahmen des Psychobiologischen Modells chronischer Schmerzsyndrome der Skelettmuskulatur (Flor & Turk, 1984; Turk & Flor, 1984) hinsichtlich einer symptomspezifischen Stressreaktivität für die allgemeine Muskelaktivierung bestätigen konnten (Burns, 2006a; Flor et al., 1985; Glombiewski et al., 2008). Eine mögliche Erklärung hierfür könnte darin liegen, dass die statischen muskulären Dysbalancen sich nicht entsprechend der allgemeinen Muskelaktivierung erhöhen. So würde eine seitengleiche Erhöhung der Muskelaktivierung die muskulären Dysbalancen nicht verstärken. Auch sind die Ergebnisse der Studien aufgrund von Unterschieden bei aktuell erlebtem Schmerz nicht vollumfänglich vergleichbar, da die Schmerzfreiheit unserer Teilnehmer die muskuläre Reaktion auf den Stressor abgeschwächt haben könnte. Das Vorhandensein oder auch die Induktion von Schmerz kann die Vulnerabilität in Bezug auf einen Stressor erhöhen (Burns, 2006b) und damit zu stärkeren Stressantworten führen.

Im Gegensatz zu den statischen Dysbalancen, die bei den Rückenschmerzpatienten unabhängig von der Bedingung im unteren Rücken stärker ausgeprägt waren, zeigten sich für

die dynamischen Dysbalancen während der Baseline-Bedingung keine Unterschiede zwischen Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern. Die dynamischen Dysbalancen nahmen für beide Teilnehmergruppen im unteren Rückenbereich von der Baseline- zur Stressbedingung zu. Im oberen Rückenbereich zeigten sich diese jedoch nur für die Rückenschmerzpatienten. Dies weist daraufhin, dass sich in diesem Bereich während des kurzfristig wirksamen Stressors Beeinträchtigungen der motorischen Kontrolle in Form eines häufigeren Belastungswechsels über die Bedingung hinweg bei Rückenschmerzpatienten manifestieren. Vermutlich kann diese deutlich ausgeprägtere, zeitversetzte Ansteuerung der Muskelaktivierung im oberen Bereich des Rückens bei Patienten entsprechend der Erkenntnisse zur beeinträchtigten motorischen Kontrolle, die sich in der Literatur beispielsweise in verringerten propriozeptiven Fähigkeiten (Tong et al., 2017) zeigt, eingeordnet werden. Dies entspricht auch der Studienlage, dass Rückenschmerzpatienten bei leichten motorischen Aufgaben unter Stress eine größere motorische Variabilität aufweisen, die kognitive Aufgabe priorisieren und sich damit Beeinträchtigungen der motorischen Kontrolle deutlicher zeigen (Lamoth et al., 2002; Sherafat et al., 2014; Smith et al., 2017). Erst bei zunehmender Schwierigkeit der motorischen Aufgabe erfolgt eine Priorisierung zu deren Gunsten.

Individuelle Variablen

In unserer Studie wurde die Stressreaktivität sowohl auf der Ebene der statischen als auch der dynamischen Dysbalancen von individuellen Variablen beeinflusst. Während höhere Ausprägungen der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung mit niedrigeren Ausprägungen der Stressreaktivität einhergingen, zeigte sich für die Depressivität ein positiver Zusammenhang zur Stressreaktivität auf der Ebene der statischen muskulären Dysbalancen. Diese Effekte waren nur bei der Teilstichprobe der Rückenschmerzpatienten feststellbar und sind konsistent mit den Annahmen des Psychobiologischen Modells chronischer Schmerzsyndrome der Skelettmuskulatur (Flor & Turk, 1984; Turk & Flor, 1984), welches postuliert, dass mangelnde Bewältigungsressourcen und maladaptive Bewertungsprozesse das Auftreten psychophysiologischer Reaktionsstereotypen begünstigen. Neben dem Einfluss der Depressivität als einem die Reaktionsstereotypie verstärkenden Faktor war in unserer Studie darüber hinaus auch der protektive Effekt einer höheren Selbstwirksamkeitserwartung zu beobachten.

Den deutlichsten Einfluss auf die muskuläre Stressreaktivität übte die Variable der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartungen aus. Hohe Ausprägungen dieser Variable hatten ei-

nen abmildernden Effekt in Bezug auf die Veränderungen der statischen und auch der dynamischen muskulären Dysbalancen unter Stress. Während einige, wenn auch nicht konsistente Befunde, zum Puffereffekt der Selbstwirksamkeit auf die physiologische Stressantwort vorliegen (Schönfeld et al., 2017), konnte nach unserem Kenntnisstand in dieser Studie zum ersten Mal ein derartiger Effekt auch für die neuromuskuläre Stressantwort nachgewiesen werden. Neben dem im Rahmen von Schmerzsyndromen häufig diskutiertem Wirkmechanismus einer Förderung von gesundheitsförderlichen Verhaltensweisen durch hohe allgemeine Selbstwirksamkeitserwartungen (Turk & Okifuji, 2002), zeigt sich so auch ein positiver Effekt auf der Ebene der muskulären Reaktionen, insbesondere der muskulären Dysbalancen, unter Stress.

Der Einfluss der individuellen Ausprägung der Depressivität auf die muskuläre Stressreaktivität bestätigt bereits vorliegende Befunde, die eine höhere allgemeine Muskelaktivierung im Rücken unter Stress bei Rückenschmerzpatienten mit hohen Depressivitätswerten nachweisen konnten (Burns, Wiegner et al., 1997; Flor et al., 1985). Dieser Zusammenhang zeigte sich in unserer Studie auch in Bezug auf die statischen muskulären Dysbalancen. Auch im Hinblick auf diesen individuellen Faktor ist dieser Zusammenhang nur bei Rückenschmerzpatienten zu beobachten. Dieser Umstand sowie die Tatsache, dass in bereits vorliegenden Studien sich dieser Zusammenhang umso ausgeprägter darstellte, je länger die Schmerzsymptomatik bestand (Burns, Wiegner et al., 1997), lässt die Schlussfolgerung zu, dass die individuelle Variable der Depressivität nicht primär für die Entstehung der muskulären Reaktionsstereotypie unter Stress verantwortlich ist, sondern sich ungünstig auf aufrechterhaltende Prozesse und Verhaltensweisen, wie beispielsweise Vermeidungsverhalten, auswirkt (Hasenbring & Verbunt, 2010). Dies kann in der Folge durchaus die muskuläre Reaktionsstereotypie unter Stress verstärken und so den Zusammenhang von Depressivität und muskulärer Stressreaktivität erklären.

Für die Variable der Ängstlichkeit zeigte sich kein Zusammenhang zur muskulären Stressreaktivität, weder für Rückenschmerzpatienten noch für gesunde Teilnehmer. Während einige Autoren für ängstlichere gesunde Teilnehmer eine höhere Muskelaktivierung in unterschiedlichen Bereichen des Körpers unter Stress nachweisen konnten (Fridlund et al., 1986; van Galen et al., 2002), sind die Ergebnisse unserer Studie vergleichbar zu denen von Willmann et al. (2012). Auch diese Autoren konnten für gesunde Probanden keinen Einfluss der Ängstlichkeit auf die Höhe der Muskelaktivierung während einer Baseline-Bedingung und auch nicht während eines kognitiven Stressors im Bereich des Trapezmuskels feststellen. Unterschiede

zwischen hoch- und niedrigängstlichen Teilnehmer waren in dieser Studie erst in der Erholungsphase zu beobachten, mit einem langsameren Rückgang der stressbedingten Muskelaktivierung bei Personen mit höheren Ausprägungen der Ängstlichkeit. Auch für die Teilstichprobe der Rückenschmerzpatienten war kein Einfluss der Variable der Ängstlichkeit nachzuweisen. Somit konnten in unserer Studie die Ergebnisse von Flor et al. (1985) nicht bestätigt werden, dass bei Rückenschmerzpatienten der Grad der Ängstlichkeit die muskuläre Stressreaktivität beeinflusst. Dies könnte zum einen darauf zurückzuführen sein, dass Flor et al. nicht die Variable der Trait-Ängstlichkeit, sondern die Zustandsangst als situative Veränderung der Ängstlichkeit in der Stressbedingung berücksichtigten. Auch wenn von einem engen Zusammenhang zwischen State- und Trait-Ängstlichkeit ausgegangen werden darf (Noteboom, Barnholt, & Enoka, 2001; Tang & Gibson, 2005), könnte dies die Ergebnisse erklären. Eventuell sind die nicht übereinstimmenden Befunde auch auf Unterschiede in der erlebten Schmerzintensität bei den Rückenschmerzpatienten der beiden Studien zurückzuführen. Die zum Zeitpunkt der Datenerhebung gegebene Schmerzfreiheit unserer Stichprobe kann geringere negative Bewertungsprozesse in der Stresssituation nach sich gezogen und dadurch den Einfluss der Trait-Ängstlichkeit reduziert haben, da sich entsprechend der Aufmerksamkeitskontrolltheorie die Zustandsangst aus der Interaktion von Ängstlichkeit als Persönlichkeitsmerkmal und der aktuellen Bewertung der Situation ergibt (Eysenck & Calvo, 1992). Zusätzlich könnte der nicht feststellbare Einfluss der Ängstlichkeit auch darauf zurückzuführen sein, dass weder die statischen noch die dynamischen muskulären Dysbalancen in direktem Zusammenhang mit der allgemeinen Muskelaktivierung stehen und somit kein der von Goldstein (1964) und Fridlund et al. (1986) formulierten Annahme einer höheren allgemeinen Muskelanspannung bei ängstlicheren Personen entsprechender Effekt zutage tritt.

Klinische Relevanz

In unserer Studie zeigten sich nach Kontrolle des Alters sowohl hinsichtlich der statischen als auch der dynamischen Dysbalancen Unterschiede zwischen gesunden Teilnehmern und Rückenschmerzpatienten. Dies entspricht den Erkenntnissen von Geisser et al. (2005), dass insbesondere unter den statischen Bedingungen des Sitzens und Stehens mithilfe des Oberflächen-EMG zwischen Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern differenziert werden kann und unterstreicht somit den Stellenwert des Einsatzes von EMG-Messungen in der Diagnostik von Rückenbeschwerden. Bei den Rückenschmerzpatienten traten unabhängig von der Bedingung höhere absolute statische Dysbalancen im unteren Rücken, also der

Hauptschmerzlokalisation der Rückenschmerzpatienten, auf. Da sich diese asymmetrische Muskelaktivierung über die Bedingungen hinweg und trotz situativer Schmerzfreiheit stärker bei den Rückenschmerzpatienten zeigt, ist davon auszugehen, dass dieses Muster langfristig besteht und eventuell über Lernprozesse erworben wurde. So passen nach van Dieën et al. (2017) Rückenschmerzpatienten ihr motorisches Verhalten, beispielsweise über eine Reduktion der motorischen Variabilität, an, um zukünftig Schmerzen zu vermeiden. Diese motorischen Anpassungen können sich, wie auch in unserer Studie, nach wiedererlangter Schmerzfreiheit fortsetzen. Zusätzlich können diese Anpassungen auch zu Veränderungen der kortikalen Repräsentation des Rumpfes und der dazugehörigen Muskulatur führen (Flor et al., 1997; Tsao et al., 2008). Dies erschwert das Wiedererlernen einer adaptiven, vergleichbar der bei Gesunden vorzufindenden motorischen Kontrolle und kann so zur Aufrechterhaltung der Rückenschmerzen beitragen und ein Wiederauftreten von Schmerzen nach beschwerdefreien Phasen begünstigen (Brumagne et al., 2019; L. H. Larsen et al., 2018). Im Laufe einer Therapie sollten deshalb auch nach erreichter Schmerzfreiheit Muster der motorischen Kontrolle überprüft und gegebenenfalls weiter verbessert werden.

Neben diesen über die Bedingungen hinweg höheren statischen muskulären Dysbalancen war bei den Rückenschmerzpatienten eine deutlich größere Streuung hinsichtlich der muskulären Stressreaktivität auf der Ebene der statischen muskulären Dysbalancen mit Zunahmen um bis zu 30 % festzustellen, wohingegen sich bei den gesunden Teilnehmern nur eine Erhöhung um bis zu 10 % zeigte. Bei den muskulären High-Respondern unter den Rückenschmerzpatienten ist davon auszugehen, dass diese Asymmetrien eine deutliche Beanspruchung der Wirbelsäule nach sich ziehen (Granata & Marras, 2000).

Im Gegensatz zu den statischen muskulären Dysbalancen sind auf der Ebene der dynamischen Dysbalancen keine Unterschiede während der Baseline-Bedingung zu beobachten, sehr wohl jedoch in der Stressbedingung. Hier weisen Rückenschmerzpatienten mehr dynamische Dysbalancen im Bereich des oberen Rückens auf. Diese Veränderungen der motorischen Kontrolle werden so erst bei zusätzlicher kognitiver Belastung erkennbar. Dieses Ergebnis weist auf die Notwendigkeit der Einbeziehung von zusätzlichen psychischen Aufgaben in das diagnostische Vorgehen, um Veränderungen der motorischen Kontrolle ganzheitlicher erfassen zu können. Für den therapeutischen Kontext lässt sich darüber hinaus ableiten, dass neben der in multimodale Behandlungskonzepte häufig integrierten Rückmeldung der allgemeinen Muskelaktivierung durch Biofeedback (Sielski et al., 2017) auch Parameter berücksichtigt werden sollten, welche die muskulären Dysbalancen unter Stress widerspiegeln. Die Tatsache,

dass sich Veränderungen der motorischen Kontrolle auf der Ebene der dynamischen Dysbalancen nur in der Stressbedingung zeigten, unterstreicht die Relevanz von Stressmanagementtechniken im Kontext der Behandlung von Rückenschmerzpatienten.

Aufgrund des deutlichen Einflusses der psychologischen Variablen der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartungen und der Depressivität auf die muskuläre Stressreaktivität sollten diese in multimodale und interdisziplinäre Therapieansätze von Rückenbeschwerden noch stärker Eingang finden. Neben den häufig intendierten Therapieeffekten der Reduktion von Schmerzen und Beeinträchtigungen, von erlebtem Distress sowie dysfunktionalen Gedanken (Glombiewski et al., 2010; Williams et al., 2012), könnte so eventuell auch ein Einfluss auf die motorische Kontrolle und Muskelaktivierung ausgeübt werden. Jedoch gilt es, die Effektivität dieser Interventionen in Bezug auf die motorische Kontrolle in zukünftigen Studien noch zu untersuchen.

Methodische Diskussion

Der in dieser Studie verwendete kognitive Stressor hat sowohl bei den Rückenschmerzpatienten als auch den gesunden Teilnehmern zuverlässig Stress induziert. Dennoch bleibt die Frage offen, ob weitere Stressoren zu noch deutlicheren Effekten geführt hätten. Flor et al. (1984) postulierten, dass insbesondere Stressoren mit persönlicher emotionaler Relevanz eine Reaktionsstereotypie bei Rückenschmerzpatienten auslösen. Dies wurde von mehreren Autoren bestätigt (Burns, Wiegner et al., 1997; DeGood et al., 1994; Flor et al., 1992), wobei auch Erkenntnisse vorliegen, dass soziale und kognitive Stressoren ohne persönliche Relevanz ebenfalls zu einer höheren Stressreaktivität bei Rückenschmerzpatienten führen (Glombiewski et al., 2008). Insbesondere hinsichtlich der nicht beobachtbaren Interaktionseffekte bei den statischen muskulären Dysbalancen wäre es zielführend, den Einfluss weiterer emotionaler und gerade auch persönlich relevanter Stressoren zu überprüfen.

Um Einflüsse aktuell bestehender Schmerzen auf die muskuläre Stressreaktivität auszuschließen, wurden nur Patienten einbezogen, die am Untersuchungstag schmerzfrei waren. Auch dies könnte zu insgesamt geringeren Effekten geführt haben. Die Kontrolle der Heterogenität in Bezug auf erlebten Schmerz schränkt zusätzlich die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Patienten mit aktuell vorliegenden Schmerzen ein. Zukünftige Studien sollten, zur Erhöhung der externen Validität, neben Patienten mit vorliegenden Schmerzen auch solche mit weiteren Schmerzregionen sowie mögliche Subgruppierungen von Schmerzpatienten

(Dankaerts et al., 2006a; O'Sullivan, 2005) berücksichtigen. Damit ließen sich noch weitreichendere Schlussfolgerungen hinsichtlich des diagnostischen Einsatzes der Parameter der statischen und dynamischen Dysbalancen generieren.

Auf der Ebene der dynamischen Dysbalancen zeigte sich in unserer Studie eine ausgeprägtere Stressreaktivität bei Rückenschmerzpatienten. Um diesen Parameter noch fundierter in Bezug auf seine Rolle bei der motorischen Kontrolle einordnen zu können, sollten zukünftige Studien weitere Validierungen, beispielsweise in Bezug auf Propriozeption, Haltungskontrolle und Bewegung, vornehmen. Aktuell nicht zu beantworten ist die Frage, ob die höheren muskulären Dysbalancen bei Rückenschmerzpatienten eine Reaktion auf erlebte Schmerzen darstellen oder schon im Vorfeld der Beschwerden auftraten und somit als ein kausaler Faktor für die Entstehung von Rückenschmerzen einzuordnen sind. Dieser Fragestellung sollten sich prospektive Längsschnittstudien widmen.

Zusammenfassung

Es zeigten sich in dieser Studie Unterschiede hinsichtlich der muskulären Dysbalancen zwischen den gesunden Teilnehmern und den Rückenschmerzpatienten. Die Patientenstichprobe wies über die Bedingungen hinweg höhere statische Dysbalancen im unteren Rücken auf, was aufgrund der vorliegenden Schmerzfreiheit auf ein konsistentes und möglicherweise über Lernprozesse erworbenes Muster spricht. In Bezug auf die dynamischen muskulären Dysbalancen konnten in der Baseline-Bedingung keine Unterschiede aufgezeigt werden, jedoch im oberen Rücken in der Stressbedingung. Diese Ergebnisse verweisen auf Unterschiede zwischen gesunden Teilnehmern und Rückenschmerzpatienten hinsichtlich der Stressreaktivität und unterstreichen die in mehreren Modellen postulierten Annahmen zur Rolle von Stress bei der Aufrechterhaltung von Rückenbeschwerden. Der zusätzliche deutliche Einfluss der psychologischen Variablen der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung und Depressivität auf die Ausprägungen der Stressreaktivität muskulärer Dysbalancen weist auf zusätzliche Ansatzpunkte für Diagnostik und Therapie hin und spricht für eine durchgängige multimodale Herangehensweise.

8. Gesamtdiskussion

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit der Fragestellung, welchen Einfluss kurzfristig wirksame Stressoren auf muskuläre Dysbalancen im gesamten Bereich des Rückens haben. Dieses als dysfunktional einzustufende Muster der Muskelaktivierung (Oddsson & Luca, 2003; van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003) wurde in drei Studien unter verschiedenen Bedingungen systematisch untersucht. Das Erkenntnisinteresse galt zudem weiteren Parametern der motorischen Kontrolle und deren Interaktion mit den muskulären Dysbalancen. Um reaktionsspezifische Anteile der Stressantwort einzubeziehen, wurden, neben sich unterscheidenden Stressoren, individuelle Variablen der Teilnehmer und auch deren Gesundheitszustand hinsichtlich vorliegender Rückenbeschwerden berücksichtigt. Im Folgenden sollen die Ergebnisse zusammenfassend betrachtet und diskutiert werden. Hierfür werden die durch kurzfristig wirksame Stressoren bedingten Veränderungen sowohl auf muskulärer Ebene als auch hinsichtlich der motorischen Kontrolle über die drei Studien hinweg verglichen und in Zusammenhang gesetzt. Darüber hinaus werden erste Schlussfolgerungen zur praktischen und klinischen Relevanz der Gesamtergebnisse skizziert, Limitationen der Arbeit aufgezeigt und ein Ausblick auf mögliche weiterführende Forschungsvorhaben gegeben.

8.1 Muskuläre Dysbalancen unter kurzfristig wirksamen Stressoren

Sowohl in Studie 1 als auch in Studie 3 zeigte sich für die körperliche Bedingung des Sitzens ein konsistentes Bild mit Erhöhungen der statischen Dysbalancen von der Baseline-Messung zur Stressbedingung. Während der kognitive Stressor in beiden Studien zu Erhöhungen im unteren und oberen Bereich des Rückens führte, waren für die emotionalen Stressoren in Studie 1 nur Erhöhungen im unteren Rückenbereich zu beobachten. Jedoch wiesen die emotionalen Stressoren teilweise deutlichere Zunahmen im unteren Rücken auf als der kognitive Stressor. Auch während einer Flexion-Extensions-Bewegung in Studie 2 war feststellbar, dass der kognitive Stressor im gesamten Bereich des Rückens die statischen muskulären Dysbalancen erhöhte. Es konnten durchgängig mittlere bis hohe Effektstärken beobachtet werden, siehe Tabelle 11.

Auf individualspezifischer Ebene konnte in Studie 2 nachgewiesen werden, dass das Geschlecht keinen Einfluss auf die Stressreaktivität der muskulären Dysbalance während einer leichten körperlichen Anforderung ausübte. Auch zeigte sich nach der Kontrolle des Alters ein vergleichbarer Effekt der Stressoren auf die muskulären Dysbalancen bei Gesunden und Rückenschmerzpatienten in Studie 3. Jedoch unterschieden sich Rückenschmerzpatienten und

gesunde Teilnehmer hinsichtlich der statischen Dysbalancen. Unabhängig von der Bedingung waren bei Rückenschmerzpatienten höhere statische muskuläre Dysbalancen im unteren Rücken zu beobachten.

Wie bereits diskutiert, weichen die Ergebnisse von Erkenntnissen zur allgemeinen Muskelaktivierung unter Stress (Burns, 2006a; Waersted & Westgaard, 1996) dahingehend ab, dass während des Sitzens die emotionalen Stressoren in Studie 1 nur zu Erhöhungen im unteren Bereich des Rückens führten, nicht jedoch im oberen Rücken. Der kognitive Stressor dagegen bedingte Erhöhungen im unteren und oberen Bereich des Rückens. Die Zunahmen im oberen Bereich des Rückens durch den kognitiven Stressor lassen sich allerdings nur eingeschränkt auf den Einfluss des kurzfristig wirksamen Stressors zurückführen, da diese Zunahmen mit Veränderungen der posturalen Kontrolle einhergingen und dadurch von dieser beeinflusst und überlagert sein könnten. In methodischer Hinsicht lässt sich daraus ableiten, dass eine Kontrolle der Bewegung in Studien, die den Einfluss von Stress untersuchen, anzuraten ist. Für den unteren Bereich des Rückens dagegen können die Erhöhungen der muskulären Dysbalancen auf den Einfluss der kurzfristig wirksamen Stressoren zurückgeführt werden. Die Zunahmen der statischen muskulären Dysbalancen während der Flexion und Extension in Studie 2 erweitern die Erkenntnisse von Marras et al. (2000) und Davis et al. (2002) dahingehend, dass neben der von diesen Autoren nachgewiesenen Erhöhung der allgemeinen Muskelaktivierung unter Stress im unteren Rücken auch die asymmetrische Muskelaktivierung zunimmt und zwar nicht nur im unteren, sondern auch im oberen Bereich des Rückens. Die absoluten Ausprägungen der statischen Dysbalancen der drei Studien sind aufgrund der unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Normalisierung der EMG-Daten nicht direkt vergleichbar, jedoch sprechen die prozentualen Zunahmen von etwa 70 % in Studie 1 und etwa 20 % in Studie 2 für deutlichere Veränderungen während des Sitzens. Dies entspricht den Annahmen von Videman (1989) und Marras (2000), dass der Einfluss von Stressoren sich insbesondere unter geringerer körperlicher Belastung zeigt.

Die Zunahmen der muskulären Dysbalancen traten in Studie 1 insofern konsistent über alle drei Stressoren hinweg auf, als Personen mit hohen Ausprägungen bezüglich der Stressreaktivität bei einem Stressor auch bei den beiden anderen Stressoren mit hohen Ausprägungen reagierten. Zudem konnte in allen drei Studien eine hohe interindividuelle Variabilität hinsichtlich der Stressreaktionen beobachtet werden, was dafür spricht, dass einige Personen deutlich ausgeprägtere neuromuskuläre Stressantworten zeigten als andere. Diese bei einigen Personen hohen Ausprägungen der asymmetrischen Muskelaktivierung führen wahrscheinlich zu

hohen Beanspruchungen der spinalen Strukturen (Granata & Marras, 2000; Marras et al., 1999). Auch wenn die gesunden Teilnehmer unserer Studie keine Rückenbeschwerden aufwiesen, könnte diese höhere Muskelaktivierung mittel- und langfristig zu Beschwerden führen. So konnten Veiersted et al. (1993) bei Untersuchungen am Arbeitsplatz beobachten, dass diejenigen Arbeitnehmer, die zu Beginn ihres Arbeitsverhältnisses eine höhere Muskelaktivierung zeigten, eher muskuloskelettale Beschwerden entwickelten als Personen mit einer geringeren Aktivierung. Nach Flor et al. (1984) entstehen muskuläre Reaktionsstereotypen unter Stress aufgrund von genetischer Disposition, Verletzungen oder frühen Lernerfahrungen. Dies spricht ebenso dafür, dass sich diese bereits vor der Manifestation von Rückenbeschwerden zeigen (Flor et al., 1990; van Dieën, Selen, & Cholewicki, 2003).

Auch wenn sich in der dritten Studie dieser Arbeit hinsichtlich der Stressreaktivität keine Unterschiede zwischen Rückenschmerzpatienten und Gesunden feststellen ließen, weisen die unabhängig von den Bedingungen höheren statischen Dysbalancen auf die Relevanz dieses Parameters hin. Dies entspricht auch den Erkenntnissen höherer muskulärer Dysbalancen bei Rückenschmerzpatienten im Sitzen und Stehen (Hoyt et al., 1981; Triano & Luttges, 1985) sowie während einer Flexion und Extension des Oberkörpers (Larivière et al., 2000; Larivière et al., 2005; Newcomer et al., 2002; Oddsson & Luca, 2003; Renkawitz et al., 2006; Triano & Schultz, 1987).

Tabelle 11

Vergleich der statischen und dynamischen muskulären Dysbalancen in Baseline und kognitiver Stressbedingung

		Statische Dysbalancen	Dynamische Dysbalancen
Gesunde			
Sitzen	Oberer Rücken	↑	→
	Unterer Rücken	↑	↑
Flexion / Extension	Oberer Rücken	↑	↑
	Unterer Rücken	↑	→
Rückenschmerz- patienten			
Sitzen	Oberer Rücken	↑	↑
	Unterer Rücken	↑	↑

Anmerkung. ↑ = Zunahme mit hoher Effektstärke, ↑ = Zunahme mit mittlere Effektstärke,
→ = keine Veränderung

Um eine zeitversetzte Ansteuerung der Muskelaktivierung der rechten und linken Seite und damit Belastungswechsel über die Zeit von der einen zur anderen Seite der Wirbelsäule abzubilden (Grabner et al., 1992), wurde aus den Daten von Studie 1 der Parameter der dynamischen Dysbalancen entwickelt. Auch diese nahmen unter kurzfristig wirksamen Stressoren zu. Bei gesunden Teilnehmern waren im Sitzen Zunahmen im unteren Bereich des Rückens sowie während der Flexion und Extension Zunahmen im oberen Bereich des Rückens zu beobachten. Bei den Rückenschmerzpatienten dagegen erhöhten sich im Sitzen die dynamischen Dysbalancen auch im oberen Bereich des Rückens, so dass hier, im Gegensatz zu den statischen Dysbalancen, Unterschiede in der Stressreaktivität zwischen gesunden Teilnehmern und Rückenschmerzpatienten zu beobachten waren.

Eine Einordnung dieser Ergebnisse ist aufgrund der Neuartigkeit des Parameters zum aktuellen Zeitpunkt nur vorläufig möglich. Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen darauf hin, dass eine Erhöhung der statischen respektive dynamischen Dysbalancen zwei unterschiedliche

Strategien der Kontrolle der Beanspruchung auf muskulärer Ebene repräsentieren. Dies kann aus den negativen Korrelationen der Reaktivitäten der absoluten und dynamischen Dysbalancen in Studie 2 geschlussfolgert werden, da die Teilnehmer entweder mit höheren statischen Dysbalancen oder mit mehr dynamischen Dysbalancen in einem Rückenbereich reagierten. Zusätzlich konnten in der Clusteranalyse zwei unterschiedliche Reaktionsmuster auf den kurzfristig wirksamen Stressor identifiziert werden. Während ca. zwei Drittel der Teilnehmer mit einer leichten Abnahme der statischen Dysbalancen und Zunahmen der dynamischen Dysbalancen sowohl im oberen als auch unteren Rücken reagierten, traten bei den übrigen Teilnehmern eine deutliche Zunahme auf der Ebene der statischen Dysbalancen sowie nur leichte Veränderungen hinsichtlich der dynamischen Dysbalancen auf. Ob diese beiden Strategien der muskulären Stabilisierung den aktuell in der Literatur diskutierten Mustern einer eher lockeren bzw. festeren Kontrolle entsprechen (Hodges et al., 2019; van Dieën et al., 2019), ist in künftigen Forschungsvorhaben noch zu überprüfen.

Die Tatsache, dass sich Rückenschmerzpatienten und gesunde Teilnehmer nur hinsichtlich der Stressreaktivität der dynamischen, nicht der statischen Dysbalancen unterscheiden, unterstreicht die Notwendigkeit der Berücksichtigung von zeitlichen Verläufen der Muskelaktivierung wie beispielsweise auch von Ringheim et al. (2019) und Falla et al. (2014) gefordert. Bei einer ausschließlichen Betrachtung statischer muskulärer Dysbalancen und deren Unterschiede auf Mittelwertebene können daraus zwar funktionelle Unterschiede im Hinblick auf die Stabilisierung der Wirbelsäule geschlussfolgert werden, nicht aber die von Flor et al. (1984) im Psychobiologischen Modells chronischer Schmerzsyndrome der Skelettmuskulatur postulierten Unterschiede in der Stressreaktivität.

Eine weitere Annahme dieses Modells besteht darin, dass mangelnde Bewältigungsressourcen und maladaptive Bewertungsprozesse das Auftreten psychophysiologischer Reaktionsstereotypen begünstigen und diese Stereotypen sich durch Variablen der Persönlichkeit vorhersagen lassen. Dies konnte in früheren Studien für die Variablen der Ängstlichkeit und Depressivität bestätigt werden (Burns, Wiegner et al., 1997; Flor et al., 1985). In der vorliegenden Arbeit wurden, neben diesen, zusätzlich die allgemeine Selbstwirksamkeitserwartung berücksichtigt. Diese Variablen der Persönlichkeit zeigten bei gesunden Teilnehmern weder in Studie 1 noch in Studie 3 einen Einfluss auf die muskuläre Stressreaktivität der statischen und dynamischen Dysbalancen. Bei den Rückenschmerzpatienten der Studie 3 hingegen kam insbesondere der Variable der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung sowie, in geringerem

Ausmaß, auch der Variable der Depressivität eine Bedeutung für die muskuläre Stressreaktivität zu. Durch die beobachtete negative Korrelation der Selbstwirksamkeitserwartung mit den Stressreaktivitäten auf muskulärer Ebene kann von einem die Stressantwort abmildernden Effekt entsprechend der Erkenntnisse von Wheaton (1985) zum Puffereffekt von Coping-Ressourcen ausgegangen werden. Der deutliche Einfluss dieser Variable entspricht Erkenntnissen von Chida und Hammer (2008), die in einer Übersichtsarbeit zu der Schlussfolgerung kamen, dass die Stressreaktivität insbesondere durch positive Zustände und Eigenschaften beeinflusst, und zwar verringert wird. Diese Einschätzung erfolgte zwar für gesunde Teilnehmer und auf der Grundlage von Prozessen auf der Ebene der HPA-Achse, zeigte sich bei uns jedoch auch entsprechend auf neuromuskulärer Ebene bei Rückenschmerzpatienten. Der differentielle Effekt für die beiden Teilstichproben in Studie 3 weist darauf hin, dass der Einfluss der Selbstwirksamkeit kein universell protektiver ist, sondern in Abhängigkeit weiterer situationsbezogener und individueller Variablen wirksam wird (Schönfeld et al., 2017).

8.2 Haltungskontrolle und Bewegung unter kurzfristig wirksamen Stressoren

In den Studien 1 und 2 wurden neben Veränderungen auf muskulärer Ebene auch solche der Haltungskontrolle und der Bewegung berücksichtigt. Zum einen sollten so mögliche Einflüsse auf die muskuläre Stressreaktivität kontrolliert, zum anderen untersucht werden, ob die Stressoren unabhängig von muskulären Veränderungen zu weiteren Effekten führen, welche die biomechanische Beanspruchung möglicherweise zusätzlich erhöhen.

So zeigten sich in Studie 1 im Sitzen insbesondere während des kognitiven Stressors Veränderungen der Haltungskontrolle mit Zunahmen der Schwankungsbreiten in mediolateraler, anterioposteriorer und vertikaler Richtung. Diese Zunahmen unter dem kurzfristig wirksamen Stressor korrelierten mit der Stressreaktivität der muskulären Dysbalancen im oberen Bereich des Rückens. Dies entspricht für diesen Bereich den vermuteten Zusammenhängen von posturalen Instabilitäten und muskulären Asymmetrien (Cram & Steger, 1983; Larivière et al., 2005), allerdings zeigte sich dies für den unteren Bereich des Rückens nicht. In Studie 2 sind aufgrund der festen Positionierung der Teilnehmer in dem Dynamometer Auswirkungen auf die muskulären Dysbalancen aufgrund einer veränderten Bewegung, wie eine Rotation des Oberkörpers, nicht zu erwarten. Jedoch ist in Studie 2 eine schnellere Durchführung der Bewegung beobachtbar. Diese Veränderung korrelierte nicht mit der Stressreaktivität der muskulären Dysbalancen und weist somit auf eine zusätzliche, von der asymmetrischen Muskelaktivierung unabhängige Veränderung der Bewegung durch die psychische Beanspruchung hin.

Der Einfluss weiterer Faktoren, die die muskuläre Dysbalancen beeinflussen könnten, wie Muskelermüdung (van Dieën et al., 1993) oder Händigkeit und Trainingszustand (Merletti et al., 1994; Renkawitz et al., 2006) ist aufgrund der Untersuchungssituationen beziehungsweise der Berücksichtigung der absoluten statt relativen Dysbalancen kontrolliert worden. So kann aus den Daten dieser Arbeit geschlossen werden, dass sich die muskulären Dysbalancen im Sitzen für den unteren Bereich des Rückens und während der definierten Bewegung unserer Studie für den gesamten Bereich des Rückens relativ unabhängig von weiteren Faktoren veränderten und damit auf die zusätzliche psychische Beanspruchung zurückzuführen sind. Auch die in Studie 3 gemessenen Unterschiede zwischen Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern, mit höheren Dysbalancen im unteren Bereich des Rückens für Patienten, sind mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf Unterschiede in der Haltungskontrolle zurückzuführen. Diese wären entsprechend der Erkenntnisse aus Studie 1 insbesondere für den oberen Bereich des Rückens zu erwarten gewesen.

Der zweite Aspekt, der durch die zusätzlich Berücksichtigung der Haltungskontrolle und Bewegung untersucht werden sollte, betraf die Erhöhung der Beanspruchung des muskuloskelettalen Systems durch Veränderungen auf diesen Ebenen. Größere Schwankungsbreiten werden in der Literatur häufig als verringerte motorische Kontrolle interpretiert (Shumway-Cook et al., 1997). Auch wenn diese über Priorisierungsprozesse durchaus einen positiven Einfluss auf die kognitive Leistung ausüben können (Lacour et al., 2008), ist aus biomechanischer Sicht davon auszugehen, dass eine verringerte Haltungskontrolle zu einer höheren Instabilität mit der möglichen Folge einer intensiveren Gewebebeanspruchung führt (Reeves et al., 2019). Bei der Betrachtung der Bewegungsgeschwindigkeit in Studie 2 fällt auf, dass sich diese im Mittel zwar signifikant veränderte, bei Betrachtung der absoluten Werte jedoch nur geringfügig. Allerdings zeigten sich deutlichere Unterschiede bei der Analyse der beiden identifizierten Muster der motorischen Kontrolle unter Stress in Studie 2. Das Muster, welches häufiger auftretende dynamische Dysbalancen aufwies, zeichnete sich zusätzlich durch eine höhere Geschwindigkeit aus. Letztere kann entweder als Indiz für eine Priorisierung der Extensions-Flexions-Bewegung gegenüber der kognitiven Aufgabe eingeordnet werden (Plummer et al., 2013), oder als eine stärker automatisierte und damit effizientere Bewegungskontrolle, aufgrund der Verlagerung von Aufmerksamkeit von der Bewegung hin zur kognitiven Aufgabe (Riley et al., 2003). Aus biomechanischer Sicht ist gleichwohl davon auszugehen, dass mit einer schnelleren Bewegungsgeschwindigkeit das Risiko einer erhöhten biomechanischen Bean-

spruchung einhergeht, da die in der Folge ungenaueren Bewegungen und stärker einwirkenden Kräfte negative Effekte auf die spinale Strukturen bedingen können (Barbado et al., 2015; Vera-Garcia et al., 2006).

So kann davon ausgegangen werden, dass sich die muskulären Dysbalancen primär aufgrund erhöhter psychischer Beanspruchung verändern. Zusätzlich zeigt sich eine intensivere biomechanische Beanspruchung unter kurzfristig wirksamen Stressoren. Die Zusammenhänge von posturaler Kontrolle und statischen Dysbalancen in Studie 1 und die Ergebnisse zur Bewegungsgeschwindigkeit in Studie 2 weisen jedoch darauf hin, dass dies nicht vollständig unabhängig voneinander geschieht.

8.3 Einordnung der Ergebnisse

Eine Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit in das in Kapitel 1.2.1 vorgestellte Modell zur Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden nach Bongers et al. (1993, 2002) sowie Sauter und Swanson (1996) erlaubt eine vernetzte Betrachtung und zeigt Erweiterungen des Modells auf, siehe Abbildung 8.

Der im Modell angenommene Wirkpfad von Effekten der erlebten psychischen Beanspruchung auf die biomechanische Beanspruchung wird von den Ergebnissen dieser Arbeit gestützt. Dies zeigte sich sowohl durch die veränderte Bewegungsgeschwindigkeit als auch die Änderungen der Haltungskontrolle. In dem Modell wird keine Beeinflussung dieses Pfades durch individuelle Variablen postuliert. Dies war jedoch in den Studien dieser Arbeit zu beobachten. Der Zusammenhang von psychischer und motorischer Beanspruchung scheint, wie in Studie 2 aufgezeigt, über Priorisierungsprozesse beeinflusst zu werden. So zeigten Personen mit schnellerer Bewegungsgeschwindigkeit eine schlechtere kognitive Leistung und umgekehrt. Auch die Tatsache, dass ängstlichere Personen geringere Ausprägungen der Haltungskontrolle in Studie 1 zeigten, unterstützt diese Annahme.

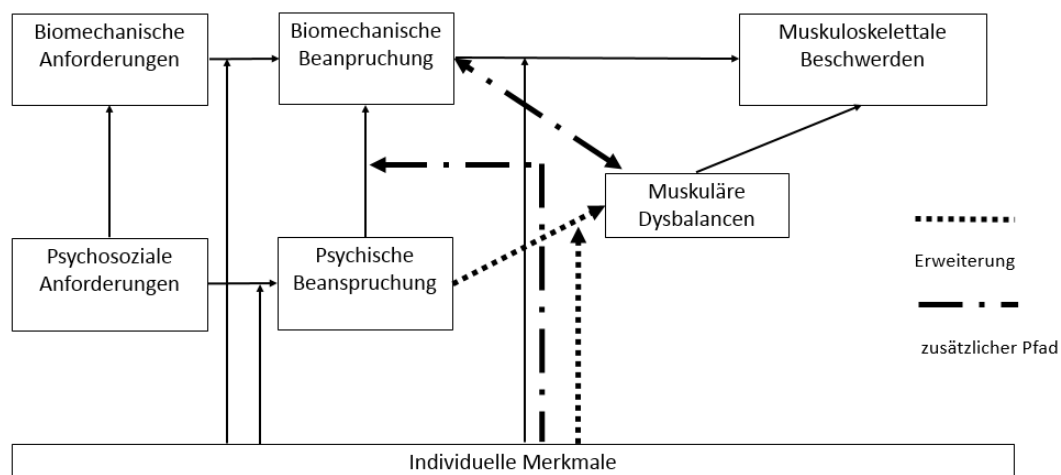
Zu den bedeutsamsten Erkenntnissen dieser Studie gehören die durch Stressoren bedingten Veränderungen der muskulären Dysbalancen. Im ursprünglichen Modell werden die Auswirkungen der erlebten psychischen Beanspruchung auf muskulärer Ebene im Sinne einer allgemeinen Erhöhung der Muskelaktivierung berücksichtigt. Der daraus resultierende negative Effekt wird dementsprechend auch primär über Auswirkungen einer über einen längeren Zeitraum gegebenen muskulären Aktivierung eingeordnet (Sjogaard et al., 2000; Westgaard, 1999). Bei den Erhöhungen der muskulären Dysbalancen unter Stress ist jedoch darüber hinaus von einer Zunahme der biomechanischen Beanspruchung auszugehen und damit von

zusätzlich erhöhten Auswirkungen auf die Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden.

Für den in dem Modell postulierten Einfluss individueller Variablen auf die Höhe der Muskelaktivierung liegen bislang nur wenige Erkenntnisse vor. Auch unsere Studien konnten keinen Zusammenhang zwischen Variablen der Persönlichkeit und der muskulären Stressreaktivität bei gesunden Teilnehmern aufzeigen. Jedoch ermöglichte das für die Rückenschmerzpatienten aufgestellte Regressionsmodell mit den Variablen der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung und der Depressivität zur Vorhersage der Stressreaktivität der statischen Dysbalancen eine hohe Varianzaufklärung von 37 %, was den Stellenwert dieser Variablen zwar nicht für die Entstehung, wohl aber die Aufrechterhaltung von Beschwerden unterstreicht.

Abbildung 8

Erweiterung des Modells zur Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden nach Bongers et al. (1993, 2002) sowie Sauter und Swanson (1996)



8.4 Praktische und klinische Ableitungen

Vorbehaltlich der noch zu bestätigenden mittel- und langfristigen Auswirkungen der Veränderungen der asymmetrischen Muskelaktivierung unter Stress lassen sich bereits einige Ableitungen für die klinische und praktische Relevanz vornehmen.

Aus dem deutlichen Einfluss von Stress sowohl auf die Muskelaktivierung als auch die weitere biomechanische Beanspruchung wird die Notwendigkeit integrierter und ganzheitli-

cher Beanspruchungsanalysen am Arbeitsplatz ersichtlich. Wenngleich der Bedarf einer kombinierten Erhebung von psychischen und physischen Belastungen und Beanspruchungen durchaus erkannt wird (Ellegast, 2010), liegt der Schwerpunkt zur Prävention von Muskel-Skelett-Erkrankungen bislang eindeutig auf der Einschätzung der physischen Belastungen. Dies zeigt sich auch in den aktuellen Empfehlungen zu Gefährdungsbeurteilungen am Arbeitsplatz (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2019).

Eine solche unabhängige Betrachtung psychischer und physischer Faktoren setzt sich im klinischen Kontext fort. Zwar werden hier sowohl in der Diagnostik als auch der Therapie psychosoziale Faktoren berücksichtigt und münden im Rahmen multimodaler Ansätze in praktische Interventionsmaßnahmen (Kempf, 2014; Luomajoki & Saner, 2012; O'Sullivan, 2005), jedoch werden die psychischen und physischen Faktoren meist getrennt voneinander gehandhabt. Eine Möglichkeit der zielgerichteten Integration bestünde beispielsweise darin, vorhandene Interventionen, die auf eine verbesserte motorische Kontrolle bei Rückenschmerzpatienten abzielen (Macedo et al., 2009; Macedo et al., 2014), systematisch um die Komponente zusätzlicher psychischen Belastungen zu ergänzen. Durch Echtzeit-Rückmeldungen zu Bewegungsmustern und Muskelaktivierung würde sich die Chance eröffnen, die Wirksamkeit weiter zu verbessern.

Die Forderung einer Berücksichtigung von Subgruppen bei Rückenschmerzpatienten (Hodges et al., 2019) reflektiert den Umstand, dass die klinischen Bilder zu muskuloskelettalen Beschwerden eine hohe Variabilität aufweisen. Dies ist auch in den Ergebnissen dieser Arbeit auf der Ebene der Stressreaktivität deutlich zu erkennen und spricht für eine Individualisierung der Prävention und Therapie. Ein multimodales Risikoassessment mit dem Ziel der Erstellung individueller Risikoprofile könnte unter Berücksichtigung von psychischen und physischen Faktoren die Effizienz und Effektivität von Maßnahmen zusätzlich erhöhen. So würden möglicherweise gerade Personen mit einer niedrigen Ausprägung allgemeiner Selbstwirksamkeitserwartungen und einer hohen muskulären Reaktivität unter Stress von Verfahren zur Rückmeldung der Muskelaktivierung und Bewegungsmuster unter unterschiedlichen Bedingungen profitieren.

8.5 Limitationen der Arbeit

Zusätzlich zu den bereits erörterten Limitationen lassen sich bei der Gesamtbetrachtung der Arbeit und der Ableitungen über die drei Studien hinweg Aspekte der Stichprobenauswahl, der Laborsituation, der Auswahl der Stressoren und auch die Aussagekraft des neu

entwickelten Parameters der dynamischen Dysbalancen diskutieren.

In allen drei Studien wurden als gesunde Teilnehmer junge Erwachsene ohne eine Vorgeschichte hinsichtlich muskuloskelettaler Beschwerden im Rücken einbezogen. Daraus resultiert als Vorteil eine Vergleichbarkeit der Daten über die drei Studien hinweg. Zudem können so verlässliche Aussagen zu asymmetrischen Mustern der Muskelrekrutierung unter kurzfristig wirksamen Stressoren im jungen Erwachsenenalter generiert werden. Gleichwohl stellt dies einen Nachteil hinsichtlich der Interpretation und Verallgemeinerung der Ergebnisse über das ganze Erwachsenenalter dar. Auch wenn sich Rückenschmerzen bereits im jungen Erwachsenenalter manifestieren können (Calvo-Muñoz et al., 2013; Hoy et al., 2010), zeigen sich nochmal höhere Inzidenzraten ab der dritten Lebensdekade (Loney & Stratford, 1999; Reigo et al., 1999). Bei einer Berücksichtigung aller Altersgruppen könnten zusätzliche Erkenntnisse zu Risikofaktoren auf der Ebene der muskulären Dysbalancen für die Entstehung von Rückenbeschwerden gewonnen werden.

Trotz der Bemühungen, die Aufgeregtheit und das Arousal in der Baseline-Bedingung möglichst gering zu halten, muss in allen drei Studien davon ausgegangen werden, dass bereits während dieser Messung ein gegenüber Alltagssituationen erhöhtes Arousal vorlag. Da die Teilnehmer unserer Studien über den Ablauf der Studie informiert wurden, stellte die Baseline-Bedingung eine Antizipationsphase vor einem Stressor dar. Die in Studie 1 und 3 gemessenen Ausprägungen der elektrodermalen Aktivität bilden dies ab und entsprechen nicht den in der Literatur zu findenden Vergleichswerten für Ruhebedingungen (Boucsein, 2012). Aufgrund der zumindest partiellen Beeinflussung der Muskelaktivität durch das sympathische Nervensystem kann davon ausgegangen werden, dass auch die Werte der Muskelaktivität schon in der Baseline erhöht waren. Dies kann, wie erwähnt, die Stressreaktivität aufgrund des Gesetzes des Ausgangswertes durchaus beeinflussen und zu einer niedrigeren Stressreaktivität führen.

Bei der Auswahl der Stressoren wurde auf vorhandene Erkenntnisse zur Stressinduktion zurückgegriffen. Aus forschungspraktischen Gründen konnte jedoch weder in Studie 2 noch in Studie 3 über den kognitiven Stressor hinausgehende Aspekte berücksichtigt werden. Auch war es aufgrund der Notwendigkeit einer strengen Kontrolle der biomechanischen Parameter nicht möglich, weitere valide Stressoren wie den *Trier Social Stress Test* (Foley & Kirschbaum, 2010; Kirschbaum et al., 1993) zu verwenden. Dadurch resultiert eine eingeschränkte ökologische Validität der Ergebnisse.

Der neu entwickelte Parameter der dynamischen Dysbalancen zeichnete sich sowohl

durch seinen Beitrag bei der Identifikation unterschiedlicher Muster der motorischen Kontrolle in Studie 2 als auch durch das Aufzeigen von Unterschieden der Stressreaktivität in Studie 3 als bedeutsam aus. Eine Einordnung der exakten Aussagekraft dieses Parameters ist jedoch zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht möglich. So kann beispielsweise nicht beurteilt werden, ob die gegenwärtig in der Literatur diskutierten Muster der festeren beziehungsweise lockereren motorischen Kontrolle (van Dieën et al., 2019) eine Entsprechung in den von uns identifizierten Clustern während der Bewegung finden. Hierfür ist eine weitere Validierung dieses Parameters erforderlich.

8.6 Ausblick und weitere Forschungsfragen

Trotz der eindeutigen Befunde zur Erhöhung der asymmetrischen Muskelaktivierung unter Stress lässt sich die klinische Relevanz zum aktuellen Zeitpunkt nicht abschließend bewerten. Hieraus resultiert die Notwendigkeit einer Einschätzung zu kurz- und langfristigen Folgen dieser Veränderungen unter Stress. Dies kann sowohl durch vertiefende numerische Analysen als auch weitere empirische Studien erfolgen. So sollte mithilfe eines numerischen Menschmodells die resultierende Beanspruchung auf die spinalen Strukturen, insbesondere die Bandscheiben und Facettengelenke berechnet werden (Putzer et al., 2016), um zusätzliche Erkenntnisse zur klinischen Relevanz zu generieren.

Eine weitere Einschätzung der Bedeutsamkeit der Stressreaktivität der muskulären Dysbalancen wäre über die Beantwortung der Fragestellung möglich, ob diese Unterschiede eine Reaktion auf bereits erlebte Schmerzen darstellen oder als Risikofaktor bereits vor der Entstehung von Rückenbeschwerden vorliegen. Studien zur allgemeinen Muskelaktivierung unter Stress lassen hierzu noch keine Aussage zu (Flor et al., 1985; Glombiewski et al., 2008). Zur Identifikation früher Anzeichen muskuloskelettaler Beschwerden wie auch für eine Nutzung solcher Erkenntnisse bei Präventionsmaßnahme wäre dies ein wichtiger Schritt. So sollten sich prospektive Studien mit dieser Fragestellung befassen und sowohl gesunde Teilnehmer als auch Gruppen von Personen mit Rückenbeschwerden, welche sich in Bezug auf den Grad der Chronifizierung unterscheiden, einbeziehen. Entsprechend der Erkenntnisse von Renkawitz et al. (2006), dass einhergehend mit einer allgemeinen Reduktion der muskulären Dysbalancen sich auch die erlebten Schmerzen verringern, könnten Interventionsstudien weitere wichtige Hinweise zum klinischen Stellenwert liefern. Diese sollten in einem ersten Schritt darauf abzielen, die muskuläre Stressreaktivität hinsichtlich der muskulären Dysbalancen zu verändern und in der Folge auch Veränderungen der motorischen Kontrolle unter Stress und

die Variable der Selbstwirksamkeit berücksichtigen.

Sowohl die Ergebnisse aus Studie 2 zu sich unterscheidenden Mustern der motorischen Kontrolle unter Stress als auch aktuelle Erkenntnisse zur Notwendigkeit der Berücksichtigung von Subgruppen bei Rückenschmerzpatienten (Foster et al., 2009; Hodges et al., 2019) legen nahe, dies in weiteren Studien zugrunde zu legen. So sollten bei der Stichprobe der Rückenschmerzpatienten eine Unterscheidung nach Subgruppen einbezogen und mit Mustern der muskulären Dysbalancen abgeglichen werden.

Aufgrund hoher Inzidenz- und Prävalenzraten von Rückenbeschwerden während der gesamten Lebensspanne sollten in künftigen Studien alle Altersgruppen berücksichtigt werden. Ein besonderes Augenmerk sollte auf Kinder und Jugendliche gelegt werden. Aufgrund der Annahme, dass sich die bei Rückenschmerzpatienten die zu beobachtenden Muster der motorischen Kontrolle über einen längeren Zeitraum hinweg entwickeln (van Dieën et al., 2017) wie auch der hohen Prävalenzraten von Rückenschmerzen im Kindheits- und Jugendalter (Calvo-Muñoz et al., 2013) sollte diese Population bei weiteren Forschungsvorhaben vorrangig berücksichtigt werden.

Aus methodischer Sicht könnte eine Vertiefung hinsichtlich des neu entwickelten Parameters der dynamischen Dysbalancen zu weiteren Erkenntnissen führen, da dieser in Bezug auf die Stressreaktivität zwischen Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern unterscheiden konnte. Auch die Identifikation von unterschiedlichen Mustern der motorischen Kontrolle unter Stress in Studie 2 verweist auf die Praktikabilität dieses Parameters. Dennoch sind weitere Studien durchzuführen, um zusätzliche Ergebnisse zur konvergenten und diskriminanten Validität zu generieren. Dies könnte beispielsweise über Korrelationen mit Parametern der posturalen Kontrolle wie Schwankungsbreite und Schwankungsfrequenz sowie mit Parametern, welche die propriozeptiven Fähigkeiten abbilden, erfolgen. Insbesondere Zusammenhänge zur posturalen Kontrolle könnten vielversprechende Perspektiven zur Interpretation des Parameters der dynamischen Dysbalancen eröffnen. Im Kontext von stärker automatisierter posturaler Kontrolle durch ein Lenken der Aufmerksamkeit von der motorischen Aufgabe der Haltungskontrolle hin zu einer kognitiven Aufgabe zeigen sich häufig geringere Schwankungsbreiten, die als effektiveres oder effizienteres Muster der posturalen Kontrolle interpretiert werden (Huxhold et al., 2006; Riley et al., 2003; Vuillerme & Nafati, 2007). Diese effizientere Strategie zeigt sich nach diesen Autoren durch geringere Schwankungsbreiten, reduzierte Variabilität und erhöhte mittlere Frequenz der Schwankungen. Eine mögliche Korrelation die-

ser Parameter mit den dynamischen Dysbalancen könnte bei weiterführenden Interpretationen hilfreich sein. Insbesondere die Frage, ob diese eine höhere Steifigkeit und engere motorischen Kontrolle bedingen, verbunden mit Kosten auf der Seite der biomechanischen Beanspruchung, könnte dadurch besser eingeschätzt werden (Stins et al., 2011).

Auch einer weiteren Differenzierung von Belastungen, sowohl auf körperlicher als auch auf psychischer Ebene, sollten sich künftige Studien widmen. Die Unterscheidung in kognitive und emotionale Stressoren in der ersten Studie dieser Arbeit erscheint plausibel und spiegelte sich in unterschiedlichen Einschätzungen auf den Ebenen des Affect Grid wider. Dennoch ist davon auszugehen, dass diese Unterscheidung deutlich durch individuelle Bewertungsprozesse überlagert werden (Everly & Lating, 2019). Künftige Untersuchungen sollten deshalb eine Individualisierung von Stressoren vornehmen und die persönliche Relevanz sowie damit verbundene Bewertungsprozesse abbilden. Die in dieser Studie verwendeten Stressoren sind hinsichtlich der zeitlichen Dauer als kurzfristig wirksam einzuschätzen. Länger wirksame Stressoren und auch eine Erhebung von Beanspruchungen über einen längeren Zeitraum im Alltag, mit einer begleitenden Messung damit einhergehender Muskelaktivierung, würde weitere Erkenntnisse zur praktischen Relevanz generieren. So ließe sich auch die Frage beantworten, ob sich Personen, die im Alltag höherem Distress ausgesetzt sind, hinsichtlich der muskulären Aktivierung und der motorischen Kontrolle unterscheiden. Seitens der körperlichen Belastung wären zur Erhöhung der ökologischen Validität alltagsnähere Bewegungsmuster und auch Muster, die hohe Anforderungen an die Stabilisierung der Wirbelsäule richten, wie Perturbationen, zugrunde zu legen. Dies verweist auch auf die Möglichkeit, Erkenntnisse und Methodik dieser Arbeit auf Gebiete wie Arbeitsplatzergonomie zu übertragen.

Die Hauptzielrichtung dieser Arbeit war es den Einfluss von psychischen Stressoren auf die Muskelaktivierung und die motorische Kontrolle zu untersuchen. Eine Ausweitung dieses Forschungsfeldes könnte durch Studien zur Auswirkung veränderter biomechanischer Anforderungen und Beanspruchungen, wie beispielsweise eine Veränderung der Haltung, auf das psychische Erleben und die Stressverarbeitung erfolgen. Dies würde eine differenzierte Einschätzung der wechselseitigen Effekte erlauben und die aktuelle Hauptbetrachtungsweise des Einflusses von psychischen Stressoren auf die biomechanische Beanspruchung erweitern (Nair et al., 2015). Dabei könnte auf Erkenntnisse der Embodiment-Forschung zurückgegriffen werden, die reziproke Beziehungen von körperlichen Ausdrücken und der Verarbeitung von Emotionen postulieren (Michalak et al., 2009; Niedenthal, 2007).

Mit der vorliegenden Arbeit konnte erstmals aufgezeigt werden, dass die asymmetrische Muskelaktivierung im Rücken unter dem Einfluss kurzfristig wirksamer Stressoren im gesamten Bereich des Rückens zunahm. Bei gesunden Teilnehmern ließen sich darüber hinaus, unter Berücksichtigung von statischen und dynamischen muskulären Dysbalancen, zwei unterschiedliche Muster der muskulären Stressreaktivität identifizieren, die auf verschiedene Strategien der motorischen Kontrolle schließen lassen. Hinweise auf die klinische Relevanz dieser Veränderungen unter Stress ergaben sich aus zu beobachtenden Unterschieden zwischen Rückenschmerzpatienten und gesunden Teilnehmern. Der deutliche Einfluss der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung und auch der Depressivität auf die Ausprägungen der muskulären Stressreaktion bei Rückenschmerzpatienten unterstrich den Stellenwert individueller psychologischer Variablen. Auch wenn künftige Studien die klinische Relevanz dieser Erkenntnisse noch zu bestätigen haben, weisen diese darauf hin, dass bei der Konzeption von Präventions- und Therapieansätzen individualisierte Rückmeldungen zu muskulären Antworten und Mustern der motorischen Kontrolle unter Stress berücksichtigt werden sollten. Zudem ließe insbesondere das Einbeziehen der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartung als Ressource einen positiven Einfluss auf die muskuläre Stressreaktivität bei Rückenschmerzpatienten erwarten.

9. Literaturverzeichnis

- Adkin, A. L., & Carpenter, M. G. (2018). New insights on emotional contributions to human postural control. *Frontiers in Neurology*, 9, Article 789. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00789>
- Adkin, A. L., Frank, J. S., Carpenter, M. G., & Peysar, G. W. (2000). Postural control is scaled to level of postural threat. *Gait & Posture*, 12(2), 87–93. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(00\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(00)00057-6)
- Ahern, D. K., Follick, M. J., Council, J. R., Laser-Wolston, N., & Litchman, H. (1988). Comparison of lumbar paravertebral EMG patterns in chronic low back pain patients and non-patient controls. *Pain*, 34(2), 153–160. [https://doi.org/10.1016/0304-3959\(88\)90160-1](https://doi.org/10.1016/0304-3959(88)90160-1)
- Ahmad, A. H., & Zakaria, R. (2015). Pain in times of stress. *The Malaysian Journal of Medical Sciences*, 22(Spec Issue), 52–61.
- Albertsen, I. M., Ghédira, M., Gracies, J.-M., & Hutin, É. (2017). Postural stability in young healthy subjects - Impact of reduced base of support, visual deprivation, dual tasking. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 33, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2017.01.005>
- Alkjaer, T., Pilegaard, M., Bakke, M., & Jensen, B. R. (2005). Effect of aging on performance, muscle activation and perceived stress during mentally demanding computer tasks. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 31(2), 152–159. <https://doi.org/10.5271/sjweh.862>
- Almajid, R., & Keshner, E. (2019). Role of gender in dual-tasking Timed Up and Go Tests: A cross-sectional study. *Journal of Motor Behavior*, 51(6), 681–689. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1565528>
- Almela, M., Hidalgo, V., Villada, C., van der Meij, L., Espín, L., Gómez-Amor, J., & Salvador, A. (2011). Salivary alpha-amylase response to acute psychosocial stress: The impact of age. *Biological Psychology*, 87(3), 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.05.008>
- Al-Yahya, E., Dawes, H., Smith, L., Dennis, A., Howells, K., & Cockburn, J. (2011). Cognitive motor interference while walking: A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35(3), 715–728. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.08.008>

- Andersson, G., Hagman, J., Talianzadeh, R., Svedberg, A., & Larsen, H. C. (2002). Effect of cognitive load on postural control. *Brain Research Bulletin*, 58(1), 135–139. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(02\)00770-0](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(02)00770-0)
- Andreassi, J. L. (2007). *Psychophysiology: Human behavior and physiological response* (5th ed.). L. Erlbaum Publishers.
- Annett, J. (2002). Subjective rating scales: Science or art? *Ergonomics*, 45(14), 966–987. <https://doi.org/10.1080/00140130210166951>
- Arena, J. G., Sherman, R. A., Bruno, G. M., & Young, T. R. (1989). Electromyographic recordings of 5 types of low back pain subjects and non-pain controls in different positions. *Pain*, 37(1), 57–65. [https://doi.org/10.1016/0304-3959\(89\)90153-X](https://doi.org/10.1016/0304-3959(89)90153-X)
- Arnrich, B., Setz, C., La Marca, R., Tröster, G., & Ehlert, U. (2010). What does your chair know about your stress level? *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine : A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 14(2), 207–214. <https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2035498>
- Arntz, A., Dreessen, L., & Jong, P. de (1994). The influence of anxiety on pain: attentional and attributional mediators. *Pain*, 56(3), 307–314. [https://doi.org/10.1016/0304-3959\(94\)90169-4](https://doi.org/10.1016/0304-3959(94)90169-4)
- Au, A. K., & Keir, P. J. (2007). Interfering effects of multitasking on muscle activity in the upper extremity. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 17(5), 578–586. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2006.06.005>
- Ax, A. F. (1953). The physiological differentiation between fear and anger in humans. *Psychosomatic Medicine*, 15(5), 433–442. <https://doi.org/10.1097/00006842-195309000-00007>
- Ax, A. F. (1964). Goals and methods of psychophysiology. *Psychophysiology*, 1(1), 8–25. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1964.tb02616.x>
- Azevedo, T., Volchan, E., Imbiriba, L., Rodrigues, E., Oliveira, J., Oliveira, L., Lutterbach, L., & Vargas, C. (2005). A freezing-like posture to pictures of mutilation. *Psychophysiology*, 42(3), 255–260. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2005.00287.x>
- Bansevicius, D., Westgaard, R. H., & Jensen, C. (1997). Mental stress of long duration: EMG activity, perceived tension, fatigue, and pain development in pain-free subjects. *Headache*, 37(8), 499–510. <https://doi.org/10.1046/j.1526-4610.1997.3708499.x>

- Barbado, D., Elvira, J. L. L., Moreno, F. J., & Vera-Garcia, F. J. (2015). Effect of performance speed on trunk movement control during the curl-up exercise. *Journal of Human Kinetics*, 46, 29–37. <https://doi.org/10.1515/hukin-2015-0031>
- Barnes, L. L. B., Harp, D., & Jung, W. S. (2002). Reliability generalization of scores on the Spielberger State-Trait Anxiety Inventory. *Educational and Psychological Measurement*, 62(4), 603–618. <https://doi.org/10.1177/0013164402062004005>
- Bayot, M., Dujardin, K., Tard, C., Defebvre, L., Bonnet, C. T., Allart, E., & Delval, A. (2018). The interaction between cognition and motor control: A theoretical framework for dual-task interference effects on posture, gait initiation, gait and turning. *Neurophysiologie Clinique = Clinical Neurophysiology*, 48(6), 361–375. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2018.10.003>
- Beauchet, O., Dubost, V., Herrmann, F. R., & Kressig, R. W. (2005). Stride-to-stride variability while backward counting among healthy young adults. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2, Article 26. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-2-26>
- Benedek, M., & Kaernbach, C. (2010). A continuous measure of phasic electrodermal activity. *Journal of Neuroscience Methods*, 190(1), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2010.04.028>
- Bergmann, A., Bolm-Audorff, U., Ditchen, D., Ellegast, R., Grifka, J., Haerting, J., Hofmann, F., Jäger, M., Linhardt, O., Luttmann, A., Meisel, H. J., Michaelis, M., Petereit-Haack, G., Schumann, B., & Seidler, A. (2017). Do occupational risks for low back pain differ from risks for specific lumbar disc diseases? Results of the German Lumbar Spine Study (EPILIFT). *Spine*, 42(20), E1204-E1211. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000002296>
- Berntson, G. G., & Cacioppo, J. T. (2007). Integrative physiology: Homeostasis, allostasis, and the orchestration of systemic physiology. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. Berntson (Eds.), *Handbook of psychophysiology* (pp. 433–452). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546396.019>
- Beste, C., Yildiz, A., Meissner, T. W., & Wolf, O. T. (2013). Stress improves task processing efficiency in dual-tasks. *Behavioural Brain Research*, 252, 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2013.06.013>
- Bibbo, D., Carli, M., Conforto, S., & Battisti, F. (2019). A sitting posture monitoring instrument to assess different levels of cognitive engagement. *Sensors*, 19(3), Article 455. <https://doi.org/10.3390/s19030455>

- Birch, L., Juul-Kristensen, B., Jensen, C., Finsen, L., & Christensen, H. (2000). Acute response to precision, time pressure and mental demand during simulated computer work. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 26(4), 299–305. <https://doi.org/10.5271/sjweh.546>
- Bittner, A. C., Byers, J. C., Hill, S. G., Zaklad, A. L., & Christ, R. E. (1989). Generic workload ratings of a mobile air defense system (LOS-F-H). *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 33(20), 1476–1480. <https://doi.org/10.1177/154193128903302026>
- Bland, M. J., & Altman, D. J. (1995). Multiple significance tests: The Bonferroni method. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, 310(6973), 170–170. <https://doi.org/10.1136/bmj.310.6973.170>
- Blascovich, J., & Tomaka, J. (1995). The biopsychosocial model of arousal regulation. In M. P. Zanna (Ed.), *Advances in experimental social psychology* (Vol. 28, pp. 1–51). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2601\(08\)60235-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2601(08)60235-X)
- Bloemsaat, J. G., Meulenbroek, R. G. J., & van Galen, G. P. (2005). Differential effects of mental load on proximal and distal arm muscle activity. *Experimental Brain Research*, 167(4), 622–634. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0066-2>
- Bloemsaat, J. G., Ruijgrok, J. M., & van Galen, G. P. (2004). Patients suffering from nonspecific work-related upper extremity disorders exhibit insufficient movement strategies. *Acta Psychologica*, 115(1), 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2003.08.003>
- Bongers, P. M., Hildebrandt, V. H., Kompier, M. A., & Winter, C. R. de (1993). Psychosocial factors at work and musculoskeletal disease. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 19(5), 297–312. <https://doi.org/10.5271/sjweh.1470>
- Bongers, P. M., Ijmker, S., van den Heuvel, S., & Blatter, B. M. (2006). Epidemiology of work related neck and upper limb problems: Psychosocial and personal risk factors (part I) and effective interventions from a bio behavioural perspective (part II). *Journal of Occupational Rehabilitation*, 16(3), 279–302. <https://doi.org/10.1007/s10926-006-9044-1>
- Bongers, P. M., Kremer, A. M., & ter Laak, J. (2002). Are psychosocial factors, risk factors for symptoms and signs of the shoulder, elbow, or hand/wrist? A review of the epidemiological literature. *American Journal of Industrial Medicine*, 41(5), 315–342. <https://doi.org/10.1002/ajim.10050>

- Bonnet, A., & Naveteur, J. (2004). Electrodermal activity in low back pain patients with and without co-morbid depression. *International Journal of Psychophysiology*, 53(1), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2004.01.004>
- Boucsein, W. (2012). *Electrodermal activity* (2. ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1126-0>
- Bradley, M. M., Codispoti, M., Cuthbert, B. N., & Lang, P. J. (2001). Emotion and motivation I: Defensive and appetitive reactions in picture processing. *Emotion*, 1(3), 276–298. <https://doi.org/10.1037//1528-3542.1.3.276>
- Briggs Myers, I., & McCaulley, M. H. (1992). *Manual, a guide to the development and use of the Myers-Briggs type indicator*. Consulting Psychologists Press.
- Brown, L. A., Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (1999). Attentional demands and postural recovery: The effects of aging. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 54(4), M165-M171. <https://doi.org/10.1093/gerona/54.4.m165>
- Brumagne, S., Cordo, P., Lysens, R., Verschueren, S., & Swinnen, S. (2000). The role of paraspinal muscle spindles in lumbosacral position sense in individuals with and without low back pain. *Spine*, 25(8), 989–994. <https://doi.org/10.1097/00007632-200004150-00015>
- Brumagne, S., Diers, M., Danneels, L., Moseley, G. L., & Hodges, P., W. (2019). Neuroplasticity of sensorimotor control in low back pain. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 49(6), 402–414. <https://doi.org/10.2519/jospt.2019.8489>
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. (2019). *MEGAPHYS - Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz*. <https://doi.org/10.21934/BAUA:BERICHT20190821>
- Bundesärztekammer (BÄK), Kassenärztliche Bundesvereinigung (KBV), Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften. (2017). *Nationale Versorgungs-Leitlinie nicht-spezifischer Kreuzschmerz – Langfassung*,. <https://www.leitlinien.de/mdb/downloads/nvl/kreuzschmerz/kreuzschmerz-2aufl-vers1-lang.pdf>
- Burden, A. (2010). How should we normalize electromyograms obtained from healthy participants? What we have learned from over 25 years of research. *Journal of*

- Electromyography and Kinesiology*, 20(6), 1023–1035. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2010.07.004>
- Burns, J. W. (1997). Anger management style and hostility: Predicting symptom-specific physiological reactivity among chronic low back pain patients. *Journal of Behavioral Medicine*, 20(6), 505–522. <https://doi.org/10.1023/a:1025564707137>
- Burns, J. W. (2006a). Arousal of negative emotions and symptom-specific reactivity in chronic low back pain patients. *Emotion*, 6(2), 309–319. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.6.2.309>
- Burns, J. W. (2006b). The role of attentional strategies in moderating links between acute pain induction and subsequent psychological stress: Evidence for symptom-specific reactivity among patients with chronic pain versus healthy nonpatients. *Emotion*, 6(2), 180–192. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.6.2.180>
- Burns, J. W., Wiegner, S., Derleth, M., Kiselica, K., & Pawl, R. (1997). Linking symptom-specific physiological reactivity to pain severity in chronic low back pain patients: A test of mediation and moderation models. *Health Psychology*, 16(4), 319–326. <https://doi.org/10.1037/0278-6133.16.4.319>
- Calvo-Muñoz, I., Gómez-Conesa, A., & Sánchez-Meca, J. (2013). Prevalence of low back pain in children and adolescents: A meta-analysis. *BMC Pediatrics*, 13, 14. <https://doi.org/10.1186/1471-2431-13-14>
- Cannon, W. B. (1932). *The wisdom of the body*. W. W. Norton & Co.
- Carpenter, L. L., Shattuck, T. T., Tyrka, A. R., Geraciotti, T. D., & Price, L. H. (2011). Effect of childhood physical abuse on cortisol stress response. *Psychopharmacology*, 214(1), 367–375. <https://doi.org/10.1007/s00213-010-2007-4>
- Carpenter, M. G., Adkin, A. L., Brawley, L. R., & Frank, J. S. (2006). Postural, physiological and psychological reactions to challenging balance: Does age make a difference? *Age and Ageing*, 35(3), 298–303. <https://doi.org/10.1093/ageing/afl002>
- Carpenter, M. G., Frank, J. S., & Silcher, C. P. (1999). Surface height effects on postural control: A hypothesis for a stiffness strategy for stance. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 9(4), 277–286.

- Carpenter, M. G., Frank, J. S., Silcher, C. P., & Peysar, G. W. (2001). The influence of postural threat on the control of upright stance. *Experimental Brain Research*, 138(2), 210–218. <https://doi.org/10.1007/s002210100681>
- Chen, M., & Bargh, J. A. (1999). Consequences of automatic evaluation: Immediate behavioral predispositions to approach or avoid the stimulus. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 25(2), 215–224. <https://doi.org/10.1177/0146167299025002007>
- Cherkin, D. C., Deyo, R. A., Street, J. H., & Barlow, W. (1996). Predicting poor outcomes for back pain seen in primary care using patients' own criteria. *Spine*, 21(24), 2900–2907. <https://doi.org/10.1097/00007632-199612150-00023>
- Chida, Y., & Hamer, M. (2008). Chronic psychosocial factors and acute physiological responses to laboratory-induced stress in healthy populations: A quantitative review of 30 years of investigations. *Psychological Bulletin*, 134(6), 829–885. <https://doi.org/10.1037/a0013342>
- Childs, E., White, T. L., & Wit, H. de (2014). Personality traits modulate emotional and physiological responses to stress. *Behavioural Pharmacology*, 25(5-6), 493–502. <https://doi.org/10.1097/FBP.0000000000000064>
- Christie, I. C., & Friedman, B. H. (2004). Autonomic specificity of discrete emotion and dimensions of affective space: A multivariate approach. *International Journal of Psychophysiology*, 51(2), 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2003.08.002>
- Christou, E. A., Jakobi, J. M., Critchlow, A., Fleshner, M., & Enoka, R. M. (2004). The 1- to 2-Hz oscillations in muscle force are exacerbated by stress, especially in older adults. *Journal of Applied Physiology*, 97(1), 225–235. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00066.2004>
- Chrousos, G. P., & Gold, P. W. (1992). The concepts of stress and stress system disorders. Overview of physical and behavioral homeostasis. *JAMA*, 267(9), 1244–1252. <https://doi.org/10.1001/jama.1992.03480090092034>
- Coenen, P., Kingma, I., Boot, C. R. L., Bongers, P. M., & van Dieën, J. H. (2014). Cumulative mechanical low-back load at work is a determinant of low-back pain. *Occupational and Environmental Medicine*, 71(5), 332–337. <https://doi.org/10.1136/oemed-2013-101862>
- Coenen, P., Kingma, I., Boot, C. R. L., Twisk, J. W. R., Bongers, P. M., & van Dieën, J. H. (2013). Cumulative low back load at work as a risk factor of low back pain: A prospective cohort

- study. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 23(1), 11–18. <https://doi.org/10.1007/s10926-012-9375-z>
- Cohen, M. J., Swanson, G. A., Naliboff, B. D., Schandler, S. L., & McArthur, D. L. (1986). Comparison of electromyographic response patterns during posture and stress tasks in chronic low back pain patterns and control. *Journal of Psychosomatic Research*, 30(2), 135–141. [https://doi.org/10.1016/0022-3999\(86\)90042-5](https://doi.org/10.1016/0022-3999(86)90042-5)
- Collins, G. A., Cohen, M. J., Naliboff, B. D., & Schandler, S. L. (1982). Comparative analysis of paraspinal and frontalis EMG, heart rate and skin conductance in chronic low back pain patients and normals to various postures and stress. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 14(1), 39–46.
- Coombes, S. A., Cauraugh, J. H., & Janelle, C. M. (2007a). Dissociating motivational direction and affective valence: Specific emotions alter central motor processes. *Psychological Science*, 18(11), 938–942. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.02005.x>
- Coombes, S. A., Cauraugh, J. H., & Janelle, C. M. (2007b). Emotional state and initiating cue alter central and peripheral motor processes. *Emotion*, 7(2), 275–284. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.7.2.275>
- Coombes, S. A., Gamble, K. M., Cauraugh, J. H., & Janelle, C. M. (2008). Emotional states alter force control during a feedback occluded motor task. *Emotion*, 8(1), 104–113. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.8.1.104>
- Coombes, S. A., Higgins, T., Gamble, K. M., Cauraugh, J. H., & Janelle, C. M. (2009). Attentional control theory: Anxiety, emotion, and motor planning. *Journal of Anxiety Disorders*, 23(8), 1072–1079. <https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2009.07.009>
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews. Neuroscience*, 3(3), 201–215. <https://doi.org/10.1038/nrn755>
- Costa, L. d. C., Maher, C. G., McAuley, J. H., Hancock, M. J., & Smeets, R. J. (2011). Self-efficacy is more important than fear of movement in mediating the relationship between pain and disability in chronic low back pain. *European Journal of Pain*, 15(2), 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.ejpain.2010.06.014>
- Cram, J. R., Lloyd, J., & Cahn, T. S. (1994). The reliability of EMG muscle scanning. *International Journal of Psychosomatics*, 41(1-4), 41–45.

- Cram, J. R., & Steger, J. C. (1983). Emg scanning in the diagnosis of chronic pain. *Biofeedback and Self-Regulation*, 8(2), 229–241. <https://doi.org/10.1007/BF00998853>
- Crawford, J. R., Obonsawin, M. C., & Allan, K. M. (1998). PASAT and components of WAIS-R performance: Convergent and discriminant validity. *Neuropsychological Rehabilitation*, 8(3), 255–272. <https://doi.org/10.1080/713755575>
- Criswell, E., & Cram, J. R. (Eds.). (2011). *Cram's introduction to surface electromyography* (2. ed.). Jones and Bartlett.
- Dankaerts, W., O'Sullivan, P., Burnett, A., & Straker, L. (2006a). Altered patterns of superficial trunk muscle activation during sitting in nonspecific chronic low back pain patients: Importance of subclassification. *Spine*, 31(17), 2017–2023. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000228728.11076.82>
- Dankaerts, W., O'Sullivan, P., Burnett, A., & Straker, L. (2006b). Differences in sitting postures are associated with nonspecific chronic low back pain disorders when patients are subclassified. *Spine*, 31(6), 698–704. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000202532.76925.d2>
- Dault, M. C., Frank, J. S., & Allard, F. (2001). Influence of a visuo-spatial, verbal and central executive working memory task on postural control. *Gait & Posture*, 14(2), 110–116. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(01\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(01)00113-8)
- Dault, M. C., Yardley, L., & Frank, J. S. (2003). Does articulation contribute to modifications of postural control during dual-task paradigms? *Cognitive Brain Research*, 16(3), 434–440. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(03\)00058-2](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(03)00058-2)
- Davis, K. G., & Marras, W. S. (2003). Partitioning the contributing role of biomechanical, psychosocial, and individual risk factors in the development of spine loads. *The Spine Journal*, 3(5), 331–338. [https://doi.org/10.1016/s1529-9430\(03\)00082-2](https://doi.org/10.1016/s1529-9430(03)00082-2)
- Davis, K. G., Marras, W. S., Heaney, C. A., Waters, T. R., & Gupta, P [Purnendu] (2002). The impact of mental processing and pacing on spine loading: 2002 Volvo Award in biomechanics. *Spine*, 27(23), 2645–2653. <https://doi.org/10.1097/01.BRS.0000035263.63619.15>
- Dawson, M. E., Schell, A. M., Fillion, D. L., & Berntson, G. G. (2007). The electrodermal system. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. Berntson (Eds.), *Handbook of psychophysiology* (pp. 157–181). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546396.007>

- Debener, S. (2001). *Individuelle Unterschiede in der frontalen EEG-Alphaasymmetrie: Emotionalität und intraindividuelle Veränderungen*. dissertation.de.
- Dedovic, K., Renwick, R., Mahani, N. K., Engert, V., Lupien, S. J., & Pruessner, J. C. (2005). The Montreal Imaging Stress Task: Using functional imaging to investigate the effects of perceiving and processing psychosocial stress in the human brain. *Journal of Psychiatry and Neuroscience*, 30(5), 319–325.
- DeGood, D. E., Stewart, W. R., Adams, L. E., & Dale, J. A. (1994). Paraspinal EMG and autonomic reactivity of patients with back pain and controls to personally relevant stress. *Perceptual and Motor Skills*, 79(3 Pt 1), 1399–1409. <https://doi.org/10.2466/pms.1994.79.3.1399>
- Del Campo, M. T., Romo, P. E., La Hoz, R. E. de, Villamor, J. M., & Mahillo-Fernández, I. (2017). Anxiety and depression predict musculoskeletal disorders in health care workers. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 72(1), 39–44. <https://doi.org/10.1080/19338244.2016.1154002>
- Derakshan, N., & Eysenck, M. W. (2009). Anxiety, processing efficiency, and cognitive performance. *European Psychologist*, 14(2), 168–176. <https://doi.org/10.1027/1016-9040.14.2.168>
- Dick, R. B., Lowe, B. D., Lu, M.-L., & Krieg, E. F. (2015). Further trends in work-related musculoskeletal disorders: A comparison of risk factors for symptoms using quality of work life data from the 2002, 2006, and 2010 General Social Survey. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 57(8), 910–928. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000000501>
- Dickerson, S. S., & Kemeny, M. E. (2004). Acute stressors and cortisol responses: A theoretical integration and synthesis of laboratory research. *Psychological Bulletin*, 130(3), 355–391. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.130.3.355>
- Dickson-Parnell, B., & Zeichner, A. (1988). The premenstrual syndrome: Psychophysiologic concomitants of perceived stress and low back pain. *Pain*, 34(2), 161–169. [https://doi.org/10.1016/0304-3959\(88\)90161-3](https://doi.org/10.1016/0304-3959(88)90161-3)

- DiDomenico, A., & Nussbaum, M. A. (2008). Interactive effects of physical and mental workload on subjective workload assessment. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(11-12), 977–983. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2008.01.012>
- Diehr, M. C., Cherner, M., Wolfson, T. J., Miller, S. W., Grant, I., & Heaton, R. K. (2003). The 50 and 100-item short forms of the Paced Auditory Serial Addition Task (PASAT): Demographically corrected norms and comparisons with the full PASAT in normal and clinical samples. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 25(4), 571–585. <https://doi.org/10.1076/jcen.25.4.571.13876>
- Dienstbier, R. A. (1989). Arousal and physiological toughness: Implications for mental and physical health. *Psychological Review*, 96(1), 84–100. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.96.1.84>
- Dolce, J. J., & Raczyński, J. M. (1985). Neuromuscular activity and electromyography in painful backs: Psychological and biomechanical models in assessment and treatment. *Psychological Bulletin*, 97(3), 502–520. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.97.3.502>
- Doumas, M., Morsanyi, K., & Young, W. R. (2018). Cognitively and socially induced stress affects postural control. *Experimental Brain Research*, 236(1), 305–314. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5128-8>
- Doumas, M., Rapp, M. A., & Krampe, R. T. (2009). Working memory and postural control: Adult age differences in potential for improvement, task priority, and dual tasking. *The Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Sciences*, 64(2), 193–201. <https://doi.org/10.1093/geronb/gbp009>
- Doumas, M., Smolders, C., Brunfaut, E., Bouckaert, F., & Krampe, R. T. (2012). Dual task performance of working memory and postural control in major depressive disorder. *Neuropsychology*, 26(1), 110–118. <https://doi.org/10.1037/a0026181>
- Dubost, V., Kressig, R. W., Gonthier, R., Herrmann, F. R., Aminian, K., Najafi, B., & Beauchet, O. (2006). Relationships between dual-task related changes in stride velocity and stride time variability in healthy older adults. *Human Movement Science*, 25(3), 372–382. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2006.03.004>

- Ekberg, K., Eklund, J., Tuveesson, M.-A., Örtengren, R., Odenrick, P., & Ericson, M. (1995). Psychological stress and muscle activity during data entry at visual display units. *Work & Stress*, 9(4), 475–490. <https://doi.org/10.1080/02678379508256894>
- Ellegast, R. P. (2010). Quantifizierung physischer Belastungen am Arbeitsplatz. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, 60(11), 386–389. <https://doi.org/10.1007/BF03344322>
- Ellert, U., Wirz, J., & Ziese, T. (2006). *Telefonischer Gesundheitssurvey des Robert-Koch-Instituts (2. Welle): Deskriptiver Ergebnisbericht* (1. Aufl.). *Beiträge zur Gesundheitsberichterstattung des Bundes*. Robert Koch Institut. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0257-1002479>
- Ellis, P. d. (2011). *The essential guide to effect sizes: Statistical power, meta-analysis, and the interpretation of research results* (reprint). Cambridge Univ. Press.
- Enders, C. K. (2010). *Applied missing data analysis. Methodology in the social sciences*. Guilford Press.
- Engel, B. T. (1960). Stimulus-response and individual-response specificity. *Archives of General Psychiatry*, 2(3), 305–313. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.1960.03590090061010>
- Everly, G. S., & Lating, J. M. (2019). The anatomy and physiology of the human stress response. In G. S. Everly (Ed.), *Clinical guide to the treatment of the human stress response* (Vol. 224, pp. 19–56). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9098-6_2
- Eysenck, M. W., & Calvo, M. G. (1992). Anxiety and performance: The processing efficiency theory. *Cognition & Emotion*, 6(6), 409–434. <https://doi.org/10.1080/02699939208409696>
- Eysenck, M. W., & Derakshan, N. (2011). New perspectives in attentional control theory. *Personality and Individual Differences*, 50(7), 955–960. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2010.08.019>
- Eysenck, M. W., Derakshan, N., Santos, R., & Calvo, M. G. (2007). Anxiety and cognitive performance: Attentional control theory. *Emotion*, 7(2), 336–353. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.7.2.336>
- Facchinetti, L., Imbiriba, L., Azevedo, T., Vargas, C., & Volchan, E. (2006). Postural modulation induced by pictures depicting prosocial or dangerous contexts. *Neuroscience Letters*, 410(1), 52–56. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2006.09.063>

- Fahrenberg, J. (1986). Psychophysiological individuality: A pattern analytic approach to personality research and psychosomatic medicine. *Advances in Behaviour Research and Therapy*, 8(1-2), 43–100. [https://doi.org/10.1016/0146-6402\(86\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0146-6402(86)90010-X)
- Falla, D., Gizzi, L., Tschapek, M., Erlenwein, J., & Petzke, F. (2014). Reduced task-induced variations in the distribution of activity across back muscle regions in individuals with low back pain. *Pain*, 155(5), 944–953. <https://doi.org/10.1016/j.pain.2014.01.027>
- Fechir, M., Schlereth, T., Purat, T., Kritzmann, S., Geber, C., Eberle, T., Gamer, M., & Birklein, F. (2008). Patterns of sympathetic responses induced by different stress tasks. *The Open Neurology Journal*, 2, 25–31. <https://doi.org/10.2174/1874205X00802010025>
- Ferguson, S. A., & Marras, W. S. (1997). A literature review of low back disorder surveillance measures and risk factors. *Clinical Biomechanics*, 12(4), 211–226. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(96\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(96)00073-3)
- Fischer, R., & Plessow, F. (2015). Efficient multitasking: Parallel versus serial processing of multiple tasks. *Frontiers in Psychology*, 6, Article 1366. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01366>
- Flor, H., Birbaumer, N., Schugens, M. M., & Lutzenberger, W. (1992). Symptom-specific psychophysiological responses in chronic pain patients. *Psychophysiology*, 29(4), 452–460. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1992.tb01718.x>
- Flor, H., Birbaumer, N., Schulte, W., & Roos, R. (1991). Stress-related electromyographic responses in patients with chronic temporomandibular pain. *Pain*, 46(2), 145–152. [https://doi.org/10.1016/0304-3959\(91\)90069-A](https://doi.org/10.1016/0304-3959(91)90069-A)
- Flor, H., Birbaumer, N., & Turk, D. C. (1990). The psychobiology of chronic pain. *Advances in Behaviour Research and Therapy*, 12(2), 47–84. [https://doi.org/10.1016/0146-6402\(90\)90007-D](https://doi.org/10.1016/0146-6402(90)90007-D)
- Flor, H., Braun, C., Elbert, T., & Birbaumer, N. (1997). Extensive reorganization of primary somatosensory cortex in chronic back pain patients. *Neuroscience Letters*, 224(1), 5–8. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(97\)13441-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(97)13441-3)
- Flor, H., & Turk, D. C. (1984). Etiological theories and treatments for chronic back pain. I. Somatic models and interventions. *Pain*, 19(2), 105–121. [https://doi.org/10.1016/0304-3959\(84\)90831-5](https://doi.org/10.1016/0304-3959(84)90831-5)

- Flor, H., & Turk, D. C. (1989). Psychophysiology of chronic pain: Do chronic pain patients exhibit symptom-specific psychophysiological responses? *Psychological Bulletin*, 105(2), 215–259. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.105.2.215>
- Flor, H., Turk, D. C., & Birbaumer, N. (1985). Assessment of stress-related psychophysiological reactions in chronic back pain patients. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 53(3), 354–364. <https://doi.org/10.1037//0022-006X.53.3.354>
- Foerster, F., Schneider, H. J., & Walschburger, P. (1983). The differentiation of individual-specific, stimulus-specific, and motivation-specific response patterns in activation processes: An inquiry investigating their stability and possible importance in psychophysiology. *Biological Psychology*, 17(1), 1–26. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(83\)90063-7](https://doi.org/10.1016/0301-0511(83)90063-7)
- Foley, P., & Kirschbaum, C. (2010). Human hypothalamus-pituitary-adrenal axis responses to acute psychosocial stress in laboratory settings. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35(1), 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.01.010>
- Formann, A. K. (1984). *Die Latent-Class-Analyse: Einführung in Theorie und Anwendung*. Beltz-Monographien. Beltz.
- Foster, N. E., Dziedzic, K. S., van der Windt, D., Fritz, J. M., & Hay, E. M. (2009). Research priorities for non-pharmacological therapies for common musculoskeletal problems: Nationally and internationally agreed recommendations. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 10, 3. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-10-3>
- Fredrikson, M. (1991). Psychophysiological theories on sympathetic nervous system reactivity in the development of essential hypertension. *Scandinavian Journal of Psychology*, 32(3), 254–274. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1991.tb00876.x>
- Freeman, M. D., Woodham, M. A., & Woodham, A. W. (2010). The role of the lumbar multifidus in chronic low back pain: A review. *PM & R*, 2(2), 142–146. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2009.11.006>
- Freiwald, J., Baumgart, C., & Konrad, P. (2007). *Einführung in die Elektromyographie: Sport - Prävention - Rehabilitation*. Spitta-Fachbuchreihe Medizin. Spitta-Verlag.
- Fridlund, A. J., Hatfield, M. E., Cottam, G. L., & Fowler, S. C. (1986). Anxiety and striate-muscle activation: Evidence from electromyographic pattern analysis. *Journal of Abnormal Psychology*, 95(3), 228–236. <https://doi.org/10.1037/0021-843X.95.3.228>

- Fritz, C. O., Morris, P. E., & Richler, J. J. (2012). Effect size estimates: Current use, calculations, and interpretation. *Journal of Experimental Psychology. General*, 141(1), 2–18. <https://doi.org/10.1037/a0024338>
- Geisser, M. E., Ranavaya, M., Haig, A. J., Roth, R. S., Zucker, R., Ambroz, C., & Caruso, M. (2005). A meta-analytic review of surface electromyography among persons with low back pain and normal, healthy controls. *The Journal of Pain*, 6(11), 711–726. <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2005.06.008>
- Geisser, M. E., Robinson, M. E., Miller, Q. L., & Bade, S. M. (2003). Psychosocial factors and functional capacity evaluation among persons with chronic pain. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 13(4), 259–276. <https://doi.org/10.1023/a:1026272721813>
- Gill, K. P., & Callaghan, M. J. (1998). The measurement of lumbar proprioception in individuals with and without low back pain. *Spine*, 23(3), 371–377. <https://doi.org/10.1097/00007632-199802010-00017>
- Glombiewski, J. A., Hartwich-Tersek, J., & Rief, W. (2010). Depression in chronic back pain patients: Prediction of pain intensity and pain disability in cognitive-behavioral treatment. *Psychosomatics*, 51(2), 130–136. [https://doi.org/10.1016/S0033-3182\(10\)70673-3](https://doi.org/10.1016/S0033-3182(10)70673-3)
- Glombiewski, J. A., Tersek, J., & Rief, W. (2008). Muscular reactivity and specificity in chronic back pain patients. *Psychosomatic Medicine*, 70(1), 125–131. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e31815c6db1>
- Glynn, L. M., Christenfeld, N., & Gerin, W. (2002). The role of rumination in recovery from reactivity: Cardiovascular consequences of emotional states. *Psychosomatic Medicine*, 64(5), 714–726. <https://doi.org/10.1097/01.psy.0000031574.42041.23>
- Goldstein, D. S., & Kopin, I. J. (2007). Evolution of concepts of stress. *Stress*, 10(2), 109–120. <https://doi.org/10.1080/10253890701288935>
- Goldstein, I. B. (1964). Role of muscle tension in personality theory. *Psychological Bulletin*, 61(6), 413–425. <https://doi.org/10.1037/h0040472>
- Grabner, M. D., Koh, T. J., & el Ghazawi, A. (1992). Decoupling of bilateral paraspinal excitation in subjects with low back pain. *Spine*, 17(10), 1219–1223. <https://doi.org/10.1097/00007632-199210000-00015>

- Granata, K. P., & Marras, W. S. (2000). Cost-benefit of muscle cocontraction in protecting against spinal instability. *Spine*, 25(11), 1398–1404. <https://doi.org/10.1097/00007632-200006010-00012>
- Gray, J. A. (1987). *Problems in the behavioural sciences, Vol. 5. The psychology of fear and stress (2nd ed.)*. Cambridge University Press.
- Green, B. N., Johnson, C. D., Haldeman, S., Griffith, E., Clay, M. B., Kane, E. J., Castellote, J. M., Rajasekaran, S., Smuck, M., Hurwitz, E. L., Randhawa, K., Yu, H., & Nordin, M. (2018). A scoping review of biopsychosocial risk factors and co-morbidities for common spinal disorders. *PloS One*, 13(6), Article e0197987. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197987>
- Greenhouse, S. W., & Geisser, S. (1959). On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika*, 24(2), 95–112. <https://doi.org/10.1007/BF02289823>
- Grier, R. A. (2015). How high is high? A meta-analysis of NASA-TLX global workload scores. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 59(1), 1727–1731. <https://doi.org/10.1177/1541931215591373>
- Gronwall, D. (1977). Paced auditory serial-addition task: A measure of recovery from concussion. *Perceptual and Motor Skills*, 44(2), 367–373. <https://doi.org/10.2466/pms.1977.44.2.367>
- Gronwall, D., & Sampson, H. D. (1974). *The psychological effects of concussion*. Auckland University Press.
- Gross, J. J., & Levenson, R. W. (1995). Emotion elicitation using films. *Cognition & Emotion*, 9(1), 87–108. <https://doi.org/10.1080/02699939508408966>
- Hagenaars, M. A., Roelofs, K., & Stins, J. (2014). Human freezing in response to affective films. *Anxiety, Stress, and Coping*, 27(1), 27–37. <https://doi.org/10.1080/10615806.2013.809420>
- Hagenaars, M. A., Stins, J., & Roelofs, K. (2012). Aversive life events enhance human freezing responses. *Journal of Experimental Psychology. General*, 141(1), 98–105. <https://doi.org/10.1037/a0024211>
- Hägg, G. M. (1991). Static work load and occupational myalgia – A new explanation model. In P. A. Anderson, D. J. Hobart, & J. V. Danhoff (Eds.), *Electromyographical kinesiology* (pp. 141–144). Elsevier.

- Hägg, G. M. (2000). Human muscle fibre abnormalities related to occupational load. *European Journal of Applied Physiology*, 83(2-3), 159–165. <https://doi.org/10.1007/s004210000274>
- Hainaut, J.-P., Caillet, G., Lestienne, F. G., & Bolmont, B. (2011). The role of trait anxiety on static balance performance in control and anxiogenic situations. *Gait & Posture*, 33(4), 604–608. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.01.017>
- Halonen, J. I., Lallukka, T., Virtanen, M., Rod, N. H., & Magnusson Hanson, L. L. (2019). Bi-directional relation between effort–reward imbalance and risk of neck-shoulder pain: Assessment of mediation through depressive symptoms using occupational longitudinal data. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 45(2), 126–133. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3768>
- Hamacher, D [Dennis], Herold, F., Wiegel, P., Hamacher, D [Daniel], & Schega, L. (2015). Brain activity during walking: A systematic review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 57, 310–327. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.08.002>
- Harada, T., Miyai, I., Suzuki, M., & Kubota, K. (2009). Gait capacity affects cortical activation patterns related to speed control in the elderly. *Experimental Brain Research*, 193(3), 445–454. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1643-y>
- Harris, C. M., & Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394(6695), 780–784. <https://doi.org/10.1038/29528>
- Hart, S. G. (2006). Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9), 904–908. <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Advances in psychology*, 52. *Human mental workload* (Vol. 52, pp. 139–183). North Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hartvigsen, J., Hancock, M. J., Kongsted, A., Louw, Q., Ferreira, M. L., Genevay, S., Hoy, D., Karppinen, J., Pransky, G., Sieper, J., Smeets, R. J., Underwood, M., Buchbinder, R., Cherkin, D. C., Foster, N. E., Maher, C. G., van Tulder, M., Anema, J. R., Chou, R., . . . Woolf, A. (2018). What low back pain is and why we need to pay attention. *The Lancet*, 391(10137), 2356–2367. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)30480-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)30480-X)

- Hasenbring, M., Chehadi, O., Titze, C., & Kreddig, N. (2014). Fear and anxiety in the transition from acute to chronic pain: There is evidence for endurance besides avoidance. *Pain Management*, 4(5), 363–374. <https://doi.org/10.2217/pmt.14.36>
- Hasenbring, M., Hallner, D., & Klasen, B. (2001). Psychologische Mechanismen in Prozess der Schmerzchronifizierung - Unter- oder überbewertet? [Psychological mechanisms in the transition from acute to chronic pain: over- or underrated?]. *Schmerz*, 15(6), 442–447. <https://doi.org/10.1007/s004820100030>
- Hasenbring, M., Korb, J., & Pfingsten, M. (2017). Psychologische Mechanismen der Chronifizierung – Konsequenzen für die Prävention. In B. Kröner-Herwig, J. Frettlöh, R. Klinger, P. Nilges, & H.-D. Basler (Eds.), *Schmerzpsychotherapie: Grundlagen - Diagnostik - Krankheitsbilder - Behandlung* (8th ed., pp. 115–131). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50512-0_7
- Hasenbring, M., Levenig, C., Hallner, D., Puschmann, A.-K., Weiffen, A., Kleinert, J., Belz, J., Schiltenswolf, M., Pfeifer, A.-C., Heidari, J., Kellmann, M., & Wippert, P.-M. (2018). Psychosoziale Risikofaktoren für chronischen Rückenschmerz in der Allgemeingesellschaft und im Leistungssport : Von der Modellbildung zum klinischen Screening – ein Review aus dem MiSpEx-Netzwerk [Psychosocial risk factors for chronic back pain in the general population and in competitive sports : From theory to clinical screening-a review from the MiSpEx network]. *Schmerz*, 32(4), 259–273. <https://doi.org/10.1007/s00482-018-0307-5>
- Hasenbring, M., Rusu, A. C., & Turk, D. C. (2012). *From acute to chronic back pain: Risk factors, mechanisms, and clinical implications*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/med/9780199558902.001.0001>
- Hasenbring, M., & Verbunt, J. A. (2010). Fear-avoidance and endurance-related responses to pain: New models of behavior and their consequences for clinical practice. *The Clinical Journal of Pain*, 26(9), 747–753. <https://doi.org/10.1097/AJP.0b013e3181e104f2>
- Hauke, A., Flintrop, J., Brun, E., & Rugulies, R. (2011). The impact of work-related psychosocial stressors on the onset of musculoskeletal disorders in specific body regions: A review and meta-analysis of 54 longitudinal studies. *Work & Stress*, 25(3), 243–256. <https://doi.org/10.1080/02678373.2011.614069>
- Hausdorff, J. M., Schweiger, A., Herman, T., Yogev-Seligmann, G., & Giladi, N. (2008). Dual-task decrements in gait: Contributing factors among healthy older adults. *The Journals of*

- Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 63(12), 1335–1343.
<https://doi.org/10.1093/gerona/63.12.1335>
- Hautzinger, M., & Bailer, M. (1993). *Allgemeine Depressionsskala (ADS)*. Beltz.
- Hautzinger, M., Bailer, M., Hofmeister, D., & Keller, F. (2012). *ADS Allgemeine Depressions-skala* (2., überarb. u. neu normierte Aufl.). Hogrefe.
- Hazlett, R. L., McLeod, D. R., & Hoehn-Saric, R. (1994). Muscle tension in generalized anxiety disorder: Elevated muscle tonus or agitated movement? *Psychophysiology*, 31(2), 189–195.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1994.tb01039.x>
- Heim, C., Newport, D. J., Bonsall, R., Miller, A. H., & Nemeroff, C. B. (2001). Altered pituitary-adrenal axis responses to provocative challenge tests in adult survivors of childhood abuse. *The American Journal of Psychiatry*, 158(4), 575–581. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.158.4.575>
- Hemming, R., Sheeran, L., van Deursen, R., & Sparkes, V. (2018). Non-specific chronic low back pain: Differences in spinal kinematics in subgroups during functional tasks. *European Spine Journal*, 27(1), 163–170. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5217-1>
- Henneman, E., & Mendell, L. M. (2011). Functional organization of motoneuron pool and its inputs. In R. Terjung (Ed.), *Comprehensive physiology* (Vol. 92, pp. 423–507). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/cphy.cp010211>
- Henneman, E., Somjen, G., & Carpenter, D. O. (1965). Excitability and inhibitability of motoneurons of different sizes. *Journal of Neurophysiology*, 28(3), 599–620. <https://doi.org/10.1152/jn.1965.28.3.599>
- Hermens, H. (1999). *European recommendations for surface ElectroMyoGraphy: Results of the SENIAM project. SENIAM: Vol. 8*. Roessingh Research and Development.
- Hewig, J., Hagemann, D., Seifert, J., Gollwitzer, M., Naumann, E., & Bartussek, D. (2005). A revised film set for the induction of basic emotions. *Cognition & Emotion*, 19(7), 1095–1109.
<https://doi.org/10.1080/02699930541000084>
- Hides, J., Gilmore, C., Stanton, W., & Bohlscheid, E. (2008). Multifidus size and symmetry among chronic LBP and healthy asymptomatic subjects. *Manual Therapy*, 13(1), 43–49.
<https://doi.org/10.1016/j.math.2006.07.017>

- Hildebrandt, J. (2003). Die Muskulatur als Ursache für Rückenschmerzen [Musculature as a source of back pain]. *Schmerz*, 17(6), 412–418. <https://doi.org/10.1007/s00482-003-0251-9>
- Hillman, C. H., Rosengren, K. S., & Smith, D. P. (2004). Emotion and motivated behavior: Postural adjustments to affective picture viewing. *Biological Psychology*, 66(1), 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2003.07.005>
- Hinz, A., Seibt, R., Hueber, B., & Schreinicke, G. (2000). Response specificity in psychophysiology. *Journal of Psychophysiology*, 14(2), 115–122. <https://doi.org/10.1027//0269-8803.14.2.115>
- Hodges, P., W., van Dieën, J. H., & Cholewicki, J. (2019). Time to reflect on the role of motor control in low back pain. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 49(6), 367–369. <https://doi.org/10.2519/jospt.2019.0104>
- Hoehn-Saric, R., Hazlett, R. L., Pourmotabbed, T., & McLeod, D. R. (1997). Does muscle tension reflect arousal? Relationship between electromyographic and electroencephalographic recordings. *Psychiatry Research*, 71(1), 49–55. [https://doi.org/10.1016/s0165-1781\(97\)00037-1](https://doi.org/10.1016/s0165-1781(97)00037-1)
- Hoehn-Saric, R., McLeod, D. R., & Zimmerli, W. D. (1989). Somatic manifestations in women with generalized anxiety disorder. Psychophysiological responses to psychological stress. *Archives of General Psychiatry*, 46(12), 1113–1119. <https://doi.org/10.1001/arch-psyc.1989.01810120055009>
- Holdwick, D. J., & Wingenfeld, S. A. (1999). The subjective experience of PASAT testing. Does the PASAT induce negative mood? *Archives of Clinical Neuropsychology*, 14(3), 273–284. <https://doi.org/10.1093/arclin/14.3.273>
- Hollman, J. H., Youdas, J. W., & Lanzino, D. J. (2011). Gender differences in dual task gait performance in older adults. *American Journal of Men's Health*, 5(1), 11–17. <https://doi.org/10.1177/1557988309357232>
- Hollmann, S., Heuer, H., & Schmidt, K.-H. (2001). Control at work: A generalized resource factor for the prevention of musculoskeletal symptoms? *Work & Stress*, 15(1), 29–39. <https://doi.org/10.1080/02678370110064636>

- Hoogendoorn, W. E., van Poppel, M. N., Bongers, P. M., Koes, B. W., & Bouter, L. M. (2000). Systematic review of psychosocial factors at work and private life as risk factors for back pain. *Spine*, 25(16), 2114–2125. <https://doi.org/10.1097/00007632-200008150-00017>
- Horslen, B. C., & Carpenter, M. G. (2011). Arousal, valence and their relative effects on postural control. *Experimental Brain Research*, 215(1), 27–34. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2867-9>
- Hoy, D., Brooks, P., Blyth, F., & Buchbinder, R. (2010). The epidemiology of low back pain. *Best Practice & Research. Clinical Rheumatology*, 24(6), 769–781. <https://doi.org/10.1016/j.berh.2010.10.002>
- Hoyer, J., & Margraf, J. (2003). Fragebögen und Ratingskalen zur globalen Messung von Angst, Ängstlichkeit und Angststörungen. In J. Hoyer & J. Margraf (Eds.), *Angstdiagnostik: Grundlagen und Testverfahren* (pp. 97–175). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18976-0_7
- Hoyt, W. H., Hunt, H. H., JR, Pauw, M. A. de, Bard, D., Shaffer, F., Passias, J. N., Robbins, D. H., JR, Runyon, D. G., Semrad, S. E., Symonds, J. T., & Watt, K. C. (1981). Electromyographic assessment of chronic low-back pain syndrome. *The Journal of the American Osteopathic Association*, 80(11), 728–730.
- Huang, G. D., Feuerstein, M., & Sauter, S. L. (2002). Occupational stress and work-related upper extremity disorders: Concepts and models. *American Journal of Industrial Medicine*, 41(5), 298–314. <https://doi.org/10.1002/ajim.10045>
- Hunter, M. C., & Hoffman, M. A. (2001). Postural control: visual and cognitive manipulations. *Gait & Posture*, 13(1), 41–48. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(00\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(00)00089-8)
- Huxhold, O., Li, S.-C., Schmiedek, F., & Lindenberger, U. (2006). Dual-tasking postural control: Aging and the effects of cognitive demand in conjunction with focus of attention. *Brain Research Bulletin*, 69(3), 294–305. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2006.01.002>
- Ibrahimi-Kaçuri, D., Murtezani, A., Rrecaj, S., Martinaj, M., & Haxhiu, B. (2015). Low back pain and obesity. *Medical Archives*, 69(2), 114–116. <https://doi.org/10.5455/medarh.2015.69.114-116>

- Jackson, T., Wang, Y [Yaley], Wang, Y [Yang], & Fan, H. (2014). Self-efficacy and chronic pain outcomes: A meta-analytic review. *The Journal of Pain*, 15(8), 800–814. <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2014.05.002>
- Jallais, C., & Gilet, A.-L. (2010). Inducing changes in arousal and valence: Comparison of two mood induction procedures. *Behavior Research Methods*, 42(1), 318–325. <https://doi.org/10.3758/BRM.42.1.318>
- James, S. L., Abate, D., Abate, K. H., Abay, S. M., Abbafati, C., Abbasi, N., Abbastabar, H., Abd-Allah, F., Abdela, J., Abdelalim, A., Abdollahpour, I., Abdulkader, R. S., Abebe, Z., Abera, S. F., Abil, O. Z., Abraha, H. N., Abu-Raddad, L. J., Abu-Rmeileh, N. M. E., Accrombessi, M. M. K., . . . Murray, C. J. L. (2018). Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 354 diseases and injuries for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*, 392(10159), 1789–1858. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32279-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32279-7)
- Janelle, C. M. (2002). Anxiety, arousal and visual attention: A mechanistic account of performance variability. *Journal of Sports Sciences*, 20(3), 237–251. <https://doi.org/10.1080/026404102317284790>
- Jarvik, J. G., Hollingworth, W., Heagerty, P. J., Haynor, D. R., Boyko, E. J., & Deyo, R. A. (2005). Three-year incidence of low back pain in an initially asymptomatic cohort: Clinical and imaging risk factors. *Spine*, 30(13), 1541–1548. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000167536.60002.87>
- Ji, J. L., Heyes, S. B., MacLeod, C., & Holmes, E. A. (2016). Emotional mental imagery as simulation of reality: Fear and beyond-A tribute to Peter Lang. *Behavior Therapy*, 47(5), 702–719. <https://doi.org/10.1016/j.beth.2015.11.004>
- Johansson, H., Arendt-Nilsson, L., Bergenheim, M., Blair, S., van Dieën, J. H., Djupsjöbacka, M., Fallentin, N., Gold, J., Hägg, G. M., Kalezić, N., Larsson, S.-E., Ljubisavljevic, M., Lyskov, E., Mano, T., Magnusson, M., Passatore, M., Pedrosa-Domellöf, F., Punnett, L., Roatta, S., & Zukowska, Z. (2003). Epilogue: An integrated model for chronic work-related myalgia "Brussels Model". In H. Johansson, U. Winhorst, M. Djupsjöbacka, & M. Passatore (Eds.), *Chronic work-related myalgia: Neuromuscular mechanisms behind work-related chronic muscle pain syndromes* (pp. 291–300). Gävle University Press.

- Johansson, J., Nordström, A., & Nordström, P. (2016). Greater fall risk in elderly women than in men is associated with increased gait variability during multitasking. *Journal of the American Medical Directors Association*, 17(6), 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2016.02.009>
- Johnson, S. K., Lange, G., DeLuca, J., Korn, L. R., & Natelson, B. (1997). The effects of fatigue on neuropsychological performance in patients with chronic fatigue syndrome, multiple sclerosis, and depression. *Applied Neuropsychology*, 4(3), 145–153. https://doi.org/10.1207/s15324826an0403_1
- Jones, B. E. (2003). Arousal systems. *Frontiers in Bioscience*, 8, 438–451. <https://doi.org/10.2741/1074>
- Jonsson, B. (1970). The functions of individual muscles in the lumbar part of the spinae muscle. *Electromyography*, 10(1), 5–21.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice Hall series in experimental psychology. Prentice Hall.
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T., Siegelbaum, S. A., Hudspeth, A. J., & Mack, S. (Eds.). (2013). *Principles of neural science* (Fifth edition). McGraw-Hill Medical.
- Kannus, P. (1994). Isokinetic evaluation of muscular performance: Implications for muscle testing and rehabilitation. *International Journal of Sports Medicine*, 15, 11–18. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021104>
- Karasek, R. A. (1979). Job demands, job decision latitude, and mental strain: Implications for job redesign. *Administrative Science Quarterly*, 24(2), 285–308. <https://doi.org/10.2307/2392498>
- Kemeny, M. E. (2003). The psychobiology of stress. *Current Directions in Psychological Science*, 12(4), 124–129. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.01246>
- Kempf, H.-D. (2014). *Die Neue Rückenschule: Das Praxisbuch* (2. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43689-9>
- Kent, P. M., & Keating, J. L. (2008). Can we predict poor recovery from recent-onset nonspecific low back pain? A systematic review. *Manual Therapy*, 13(1), 12–28. <https://doi.org/10.1016/j.math.2007.05.009>

- Kirschbaum, C., Pirke, K. M., & Hellhammer, D. H. (1993). The 'Trier Social Stress Test'--a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. *Neuropsychobiology*, 28(1-2), 76–81. <https://doi.org/10.1159/000119004>
- Kober, H., Barrett, L. F., Joseph, J., Bliss-Moreau, E., Lindquist, K., & Wager, T. D. (2008). Functional grouping and cortical-subcortical interactions in emotion: A meta-analysis of neuroimaging studies. *NeuroImage*, 42(2), 998–1031. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.03.059>
- Koch, C., & Hänsel, F. (2019). Non-specific low back pain and postural control during quiet standing-A systematic review. *Frontiers in Psychology*, 10, Article 586. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00586>
- Koch, P., Schablon, A., Latza, U., & Nienhaus, A. (2014). Musculoskeletal pain and effort-reward imbalance-A systematic review. *BMC Public Health*, 14, Article 37. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-14-37>
- Koes, B. W., van Tulder, M., & Thomas, S. (2006). Diagnosis and treatment of low back pain. *BMJ*, 332(7555), 1430–1434. <https://doi.org/10.1136/bmj.332.7555.1430>
- Kolotylova, T., Koschke, M., Bär, K.-J., Ebner-Priemer, U., Kleindienst, N., Bohus, M., & Schmahl, C. (2010). Entwicklung des "Mannheimer Multikomponenten-Stress-Test" (MMST) [Development of the "Mannheim Multicomponent Stress Test" (MMST)]. *Psychotherapie, Psychosomatik, medizinische Psychologie*, 60(2), 64–72. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1103297>
- Konrad, P. (2005). EMG-Fibel. Eine praxisorientierte Einführung in die kinesiologische Elektromyographie. Version 1.0. <http://www.velamed.com/wp-content/uploads/EMG-FIBEL-V1.1.pdf>
- Kopec, J. A., Sayre, E. C., & Esdaile, J. M. (2004). Predictors of back pain in a general population cohort. *Spine*, 29(1), 70–77. <https://doi.org/10.1097/01.BRS.0000103942.81227.7F>
- Kraatz, S., Lang, J [Jessica], Kraus, T., Münster, E., & Ochsmann, E. (2013). The incremental effect of psychosocial workplace factors on the development of neck and shoulder disorders: A systematic review of longitudinal studies. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 86(4), 375–395. <https://doi.org/10.1007/s00420-013-0848-y>

- Krantz, G., Forsman, M., & Lundberg, U. (2004). Consistency in physiological stress responses and electromyographic activity during induced stress exposure in women and men. *Integrative Physiological and Behavioral Science*, 39(2), 105–118. <https://doi.org/10.1007/BF02734276>
- Kreibig, S. D. (2010). Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological Psychology*, 84(3), 394–421. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2010.03.010>
- Kudielka, B. M., Hellhammer, D. H., & Wüst, S. (2009). Why do we respond so differently? Re-viewing determinants of human salivary cortisol responses to challenge. *Psychoneuroendocrinology*, 34(1), 2–18. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2008.10.004>
- Lacey, J. I., Bateman, D. E., & van Lehn, R. (1952). Autonomic response specificity and Rorschach color responses. *Psychosomatic Medicine*, 14(4), 256–260. <https://doi.org/10.1097/00006842-195207000-00003>
- Lacey, J. I., & Lacey, B. C. (1958). Verification and extension of the principle of autonomic response-stereotypy. *The American Journal of Psychology*, 71(1), 50–73. <https://doi.org/10.2307/1419197>
- Lacour, M., Bernard-Demanze, L., & Dumitrescu, M. (2008). Posture control, aging, and attention resources: Models and posture-analysis methods. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 38(6), 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.005>
- Laird, R. A., Gilbert, J., Kent, P., & Keating, J. L. (2014). Comparing lumbo-pelvic kinematics in people with and without back pain: A systematic review and meta-analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 15, Article 229. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-15-229>
- Lajoie, Y., Richer, N., Jehu, D. A., & Tran, Y. (2016). Continuous cognitive tasks improve postural control compared to discrete cognitive tasks. *Journal of Motor Behavior*, 48(3), 264–269. <https://doi.org/10.1080/00222895.2015.1089833>
- Lajoie, Y., Teasdale, N., Bard, C., & Fleury, M. (1996). Upright standing and gait: Are there changes in attentional requirements related to normal aging? *Experimental Aging Research*, 22(2), 185–198. <https://doi.org/10.1080/03610739608254006>
- Lamoth, C. J. C., Meijer, O. G., Daffertshofer, A., Wuisman, P. I. J. M., & Beek, P. (2006). Effects of chronic low back pain on trunk coordination and back muscle activity during walking:

- Changes in motor control. *European Spine Journal*, 15(1), 23–40. <https://doi.org/10.1007/s00586-004-0825-y>
- Lamoth, C. J. C., Meijer, O. G., Wuisman, P. I. J. M., van Dieën, J. H., Levin, M. F., & Beek, P. (2002). Pelvis-thorax coordination in the transverse plane during walking in persons with nonspecific low back pain. *Spine*, 27(4), E92-E99. <https://doi.org/10.1097/00007632-200202150-00016>
- Lamoth, C. J. C., Stins, J., Pont, M., Kerckhoff, F., & Beek, P. (2008). Effects of attention on the control of locomotion in individuals with chronic low back pain. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 5, Article 13. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-5-13>
- Lang, J [Jessica], Ochsmann, E., Kraus, T., & Lang, J. W. B. (2012). Psychosocial work stressors as antecedents of musculoskeletal problems: A systematic review and meta-analysis of stability-adjusted longitudinal studies. *Social Science & Medicine (1982)*, 75(7), 1163–1174. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2012.04.015>
- Larivière, C., Gagnon, D., Arsenault, A. B., Gravel, D., & Loisel, P. (2005). Electromyographic activity imbalances between contralateral back muscles: An assessment of measurement properties. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 42(2), 235–250. <https://doi.org/10.1682/jrrd.2004.01.0008>
- Larivière, C., Gagnon, D., & Loisel, P. (2000). The comparison of trunk muscles EMG activation between subjects with and without chronic low back pain during flexion–extension and lateral bending tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 10(2), 79–91. [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(99\)00027-9](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(99)00027-9)
- Larivière, C., Shahvarpour, A., Gravel, C., Gauvin, M., Jean, A.-M., Viau, A., & Mecheri, H. (2019). Revisiting the effect of manipulating lumbar stability with load magnitudes and positions: The effect of sex on trunk muscle activation. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 46, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2019.03.001>
- Larsen, J. T., Berntson, G. G., Poehlmann, K. M., Ito, T. A., & Cacioppo, J. T. (2008). The psychophysiology of emotion. In M. Barrett, J. M. Haviland-Jones, & L. F. Barrett (Eds.), *Handbook of emotions* (pp. 180–195). The Guilford Press.

- Larsen, L. H., Hirata, R. P., & Graven-Nielsen, T. (2018). Experimental low back pain decreased trunk muscle activity in currently asymptomatic recurrent low back pain patients during step tasks. *The Journal of Pain*, 19(5), 542–551. <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2017.12.263>
- Larsson, S.-E., Larsson, R., Zhang, Q., Cai, H., & Åke Öberg, P. (1995). Effects of psychophysiological stress on trapezius muscles blood flow and electromyography during static load. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 71(6), 493–498. <https://doi.org/10.1007/BF00238550>
- Laursen, B., & Jensen, B. R. (2000). Shoulder muscle activity in young and older people during a computer mouse task. *Clinical Biomechanics*, 15 Suppl 1, S30-S33. [https://doi.org/10.1016/s0268-0033\(00\)00057-7](https://doi.org/10.1016/s0268-0033(00)00057-7)
- Laursen, B., Jensen, B. R., Garde, A. H., & Jorgensen, A. H. (2002). Effect of mental and physical demands on muscular activity during the use of a computer mouse and a keyboard. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 28(4), 215–221. <https://doi.org/10.5271/sjweh.668>
- Laursen, B., Jensen, B. R., & Sjøgaard, G. (1998). Effect of speed and precision demands on human shoulder muscle electromyography during a repetitive task. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 78(6), 544–548. <https://doi.org/10.1007/s004210050458>
- Laux, L., Glanzmann, P., Schaffner, P., & Spielberger, C. (1981). *Das Stait-Trait-Angstinventar*. Beltz.
- Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1986). Cognitive theories of stress and the issue of circularity. In M. H. Appley & R. Trumbull (Eds.), *The Plenum series on stress and coping. Dynamics of stress: Physiological, psychological, and social perspectives* (pp. 63–80). Plenum Press.
- Lee, H., Hübscher, M., Moseley, G. L., Kamper, S. J., Traeger, A. C., Mansell, G., & McAuley, J. H. (2015). How does pain lead to disability? A systematic review and meta-analysis of mediation studies in people with back and neck pain. *Pain*, 156(6), 988–997. <https://doi.org/10.1097/j.pain.000000000000146>

- Lee, P. J., Rogers, E. L., & Granata, K. P. (2006). Active trunk stiffness increases with co-contraction. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 16(1), 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2005.06.006>
- Lehmann-Horn, F. (2007). Motorische Systeme. In R. F. Schmidt & F. Lang (Eds.), *Springer-Lehrbuch. Physiologie des Menschen: Mit Pathophysiologie* (30th ed., Vol. 2, pp. 143–183). Springer Medizin Verlag Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-32910-7_7
- Lehr, D., Hillert, A., Schmitz, E., & Sosnowsky, N. (2008). Screening depressiver Störungen mittels Allgemeiner Depressions-Skala (ADS-K) und State-Trait Depressions Scales (STDS-T). *Diagnostica*, 54(2), 61–70. <https://doi.org/10.1026/0012-1924.54.2.61>
- Lelard, T., Godefroy, O., Ahmaidi, S., Krystkowiak, P., & Mouras, H. (2017). Mental simulation of painful situations has an impact on posture and psychophysiological parameters. *Frontiers in Psychology*, 8, Article 2012. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.02012>
- Lelard, T., Montalan, B., Morel, M. F., Krystkowiak, P., Ahmaidi, S., Godefroy, O., & Mouras, H. (2013). Postural correlates with painful situations. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, Article 4. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00004>
- Lelard, T., Stins, J., & Mouras, H. (2019). Postural responses to emotional visual stimuli. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 49(2), 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2019.01.005>
- Lewis, S., Holmes, P., Woby, S., Hindle, J., & Fowler, N. (2012). The relationships between measures of stature recovery, muscle activity and psychological factors in patients with chronic low back pain. *Manual Therapy*, 17(1), 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.math.2011.08.001>
- Leyman, E., Mirka, G., Kaber, D., & Sommerich, C. (2004). Cervicobrachial muscle response to cognitive load in a dual-task scenario. *Ergonomics*, 47(6), 625–645. <https://doi.org/10.1080/00140130310001629766>
- Lindenberger, U., Marsiske, M., & Baltes, P. B. (2000). Memorizing while walking: Increase in dual-task costs from young adulthood to old age. *Psychology and Aging*, 15(3), 417–436. <https://doi.org/10.1037//0882-7974.15.3.417>

- Lindman, R., Eriksson, A., & Thornell, L. E. (1991). Fiber type composition of the human female trapezius muscle: Enzyme-histochemical characteristics. *The American Journal of Anatomy*, 190(4), 385–392. <https://doi.org/10.1002/aja.1001900406>
- Linton, S. J. (2000). A review of psychological risk factors in back and neck pain. *Spine*, 25(9), 1148–1156. <https://doi.org/10.1097/00007632-200005010-00017>
- Linton, S. J. (2001). Occupational psychological factors increase the risk for back pain: A systematic review. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 11(1), 53–66. <https://doi.org/10.1023/A:1016656225318>
- Loney, P. L., & Stratford, P. W. (1999). The prevalence of low back pain in adults: A methodological review of the literature. *Physical Therapy*, 79(4), 384–396.
- Longo, L., & Leva, M. C. (2019). *Human mental workload: Models and applications* (Vol. 1012). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-14273-5>
- Luca, C. J. de (1997). The use of surface electromyography in biomechanics. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(2), 135–163. <https://doi.org/10.1123/jab.13.2.135>
- Luijckx, R., Hermens, H., Bodar, L., Vossen, C. J., van Os, J., & Lousberg, R. (2014). Experimentally induced stress validated by EMG activity. *PloS One*, 9(4), Article e95215. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095215>
- Luijckx, R., Vossen, C. J., Roggeveen, S., van Os, J., Hermens, H., & Lousberg, R. (2016). Impact of early life adversity on EMG stress reactivity of the trapezius muscle. *Medicine*, 95(39), Article e4745. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000004745>
- Lund, J. P., Donga, R., Widmer, C. G., & Stohler, C. S. (1991). The pain-adaptation model: A discussion of the relationship between chronic musculoskeletal pain and motor activity. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 69(5), 683–694. <https://doi.org/10.1139/y91-102>
- Lundberg, U. (2002). Psychophysiology of work: Stress, gender, endocrine response, and work-related upper extremity disorders. *American Journal of Industrial Medicine*, 41(5), 383–392. <https://doi.org/10.1002/ajim.10038>

- Lundberg, U., Forsman, M., Zachau, G., Eklöf, M., Palmerud, G., Melin, B., & Kadefors, R. (2002). Effects of experimentally induced mental and physical stress on motor unit recruitment in the trapezius muscle. *Work & Stress*, 16(2), 166–178. <https://doi.org/10.1080/02678370210136699>
- Lundberg, U., Kadefors, R., Melin, B., Palmerud, G., Hassmen, P., Engstrom, M., & Dohns, I. E. (1994). Psychophysiological stress and EMG activity of the trapezius muscle. *International Journal of Behavioral Medicine*, 1(4), 354–370. https://doi.org/10.1207/s15327558ijbm0104_5
- Luomajoki, H., & Saner, J. (2012). Bewegungskontrolldysfunktion als Subgruppe von unspezifischen Rückenschmerzen. *Manuelle Medizin*, 50(5), 387–392. <https://doi.org/10.1007/s00337-012-0948-x>
- Luoto, S., Taimela, S., Hurri, H., Aalto, H., Pyykkö, I., & Alaranta, H. (1996). Psychomotor speed and postural control in chronic low back pain patients: A controlled follow-up study. *Spine*, 21(22), 2621–2627. <https://doi.org/10.1097/00007632-199611150-00012>
- Lykken, D. T., & Venables, P. H. (1971). Direct measurement of skin conductance: A proposal for standardization. *Psychophysiology*, 8(5), 656–672. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1971.tb00501.x>
- MacDonald, W., & Evans, O. (2006). *Research on the prevention of work-related musculoskeletal disorders. Stage 1 - Literature Review*. https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1702/research_prevention_workrelated_musculoskeletal_disorders_stage_1_literature_review.pdf
- MacDonell, C. W., & Keir, P. J. (2005). Interfering effects of the task demands of grip force and mental processing on isometric shoulder strength and muscle activity. *Ergonomics*, 48(15), 1749–1769. <https://doi.org/10.1080/00140130500319757>
- Macedo, L. G., Maher, C. G., Hancock, M. J., Kamper, S. J., McAuley, J. H., Stanton, T. R., Stafford, R., & Hodges, P., W. (2014). Predicting response to motor control exercises and graded activity for patients with low back pain: Preplanned secondary analysis of a randomized controlled trial. *Physical Therapy*, 94(11), 1543–1554. <https://doi.org/10.2522/ptj.20140014>

- Macedo, L. G., Maher, C. G., Latimer, J., & McAuley, J. H. (2009). Motor control exercise for persistent, nonspecific low back pain: A systematic review. *Physical Therapy*, 89(1), 9–25. <https://doi.org/10.2522/ptj.20080103>
- Macfarlane, G. J., Pallewatte, N., Paudyal, P., Blyth, F. M., Coggon, D., Crombez, G., Linton, S., Leino-Arjas, P., Silman, A. J., Smeets, R. J., & van der Windt, D. (2009). Evaluation of work-related psychosocial factors and regional musculoskeletal pain: Results from a EULAR Task Force. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 68(6), 885–891. <https://doi.org/10.1136/ard.2008.090829>
- MacNeilage, P. F. (1966). Changes in electroencephalogram and other physiological measures during serial mental performance. *Psychophysiology*, 2(4), 344–353. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1966.tb02664.x>
- Maki, B. E., & McIlroy, W. E. (1996). Influence of arousal and attention on the control of postural sway. *Journal of Vestibular Research*, 6(1), 53–59. <https://doi.org/10.3233/VES-1996-6107>
- Malmo, R. B., Shagass, C., & Davis, F. H. (1949). Specificity of bodily reactions under stress; a physiological study of somatic symptom mechanisms in psychiatric patients. *Research Publications - Association for Research in Nervous and Mental Disease*, 29, 231–261.
- Mansikka, H., Virtanen, K., & Harris, D. (2019). Comparison of NASA-TLX scale, modified Cooper-Harper scale and mean inter-beat interval as measures of pilot mental workload during simulated flight tasks. *Ergonomics*, 62(2), 246–254. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1471159>
- Marker, R. J., Campeau, S., & Maluf, K. S. (2017). Psychosocial stress alters the strength of reticulospinal input to the human upper trapezius. *Journal of Neurophysiology*, 117(1), 457–466. <https://doi.org/10.1152/jn.00448.2016>
- Marras, W. S. (2000). Occupational low back disorder causation and control. *Ergonomics*, 43(7), 880–902. <https://doi.org/10.1080/001401300409080>
- Marras, W. S. (2012). The complex spine: The multidimensional system of causal pathways for low-back disorders. *Human Factors*, 54(6), 881–889. <https://doi.org/10.1177/0018720812452129>

- Marras, W. S., Davis, K. G., Ferguson, S. A., Lucas, B. R., & Gupta, P [Purnendu] (2001). Spine loading characteristics of patients with low back pain compared with asymptomatic individuals. *Spine*, 26(23), 2566–2574. <https://doi.org/10.1097/00007632-200112010-00009>
- Marras, W. S., Davis, K. G., Heaney, C. A., Maronitis, A. B., & Allread, W. G. (2000). The influence of psychosocial stress, gender, and personality on mechanical loading of the lumbar spine. *Spine*, 25(23), 3045–3054. <https://doi.org/10.1097/00007632-200012010-00012>
- Marras, W. S., Davis, K. G., & Jorgensen, M. (2003). Gender influences on spine loads during complex lifting. *The Spine Journal*, 3(2), 93–99. [https://doi.org/10.1016/s1529-9430\(02\)00570-3](https://doi.org/10.1016/s1529-9430(02)00570-3)
- Marras, W. S., Ferguson, S. A., Burr, D., Davis, K. G., & Gupta, P [Purnendu] (2004). Spine loading in patients with low back pain during asymmetric lifting exertions. *The Spine Journal*, 4(1), 64–75. [https://doi.org/10.1016/s1529-9430\(03\)00424-8](https://doi.org/10.1016/s1529-9430(03)00424-8)
- Marras, W. S., Ferguson, S. A., Gupta, P [Purnendu], Bose, S., Parnianpour, M., Kim, J. Y., & Crowell, R. R. (1999). The quantification of low back disorder using motion measures. Methodology and validation. *Spine*, 24(20), 2091–2100. <https://doi.org/10.1097/00007632-199910150-00005>
- Marras, W. S., Lavender, S. A., Leurgans, S. E., Fathallah, F. A., Ferguson, S. A., Allread, W. G., & Rajulu, S. L. (1995). Biomechanical risk factors for occupationally related low back disorders. *Ergonomics*, 38(2), 377–410. <https://doi.org/10.1080/00140139508925111>
- Marwitz, M., & Stemmler, G. (1998). On the status of individual response specificity. *Psychophysiology*, 35(1), 1–15. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3510001>
- Mathias, C. W., Stanford, M. S., & Houston, R. J. (2004). The physiological experience of the Paced Auditory Serial Addition Task (PASAT): Does the PASAT induce autonomic arousal? *Archives of Clinical Neuropsychology*, 19(4), 543–554. <https://doi.org/10.1016/j.acn.2003.08.001>
- Maydych, V., Claus, M., Watzl, C., & Kleinsorge, T. (2018). Attention to emotional information is associated with cytokine responses to psychological stress. *Frontiers in Neuroscience*, 12, Article 687. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00687>

- Mayer, J., Kraus, T., & Ochsmann, E. (2012). Longitudinal evidence for the association between work-related physical exposures and neck and/or shoulder complaints: A systematic review. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 85(6), 587–603. <https://doi.org/10.1007/s00420-011-0701-0>
- Maylor, E. A., & Wing, A. M. (1996). Age differences in postural stability are increased by additional cognitive demands. *The Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Sciences*, 51(3), P143-P154. <https://doi.org/10.1093/geronb/51b.3.p143>
- Mazaheri, M., Coenen, P., Parnianpour, M., Kiers, H., & van Dieën, J. H. (2013). Low back pain and postural sway during quiet standing with and without sensory manipulation: A systematic review. *Gait & Posture*, 37(1), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.06.013>
- Mazaheri, M., Salavati, M., Negahban, H., Sanjari, M. A., & Parnianpour, M. (2010). Postural sway in low back pain: Effects of dual tasks. *Gait & Posture*, 31(1), 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.09.009>
- McCaffrey, R. J., Westervelt, H. J., & Haase, R. F. (2001). Serial neuropsychological assessment with the National Institute of Mental Health (NIMH) AIDS Abbreviated Neuropsychological Battery. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 16(1), 9–18. <https://doi.org/10.1093/arclin/16.1.9>
- McEwen, B. S. (1998). Stress, adaptation, and disease. Allostasis and allostatic load. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 840, 33–44. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1998.tb09546.x>
- Mclsaac, T. L., Lamberg, E. M., & Muratori, L. M. (2015). Building a framework for a dual task taxonomy. *BioMed Research International*, 2015, Article 591475. <https://doi.org/10.1155/2015/591475>
- McKendrick, R. D., & Cherry, E. (2018). A deeper look at the NASA TLX and where it falls short. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 62(1), 44–48. <https://doi.org/10.1177/1541931218621010>
- Mclean, L., & Urquhart, N. (2002). The influence of psychological stressors on myoelectrical signal activity in the shoulder region during a data entry task. *Work & Stress*, 16(2), 138–153. <https://doi.org/10.1080/02678370210136707>

- McLeod, P. (1977). Parallel processing and the psychological refractory period. *Acta Psychologica*, 41(5), 381–396. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(77\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0001-6918(77)90016-6)
- Mehta, R. K., & Agnew, M. J. (2011). Effects of concurrent physical and mental demands for a short duration static task. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(5), 488–493. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2011.04.005>
- Mehta, R. K., Nussbaum, M. A., & Agnew, M. J. (2012). Muscle- and task-dependent responses to concurrent physical and mental workload during intermittent static work. *Ergonomics*, 55(10), 1166–1179. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.703695>
- Mehta, R. K., & Rhee, J. (2017). Age-specific neural strategies to maintain motor performance after an acute social stress bout. *Experimental Brain Research*, 235(7), 2049–2057. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-4949-9>
- Melin, B., & Lundberg, U. (1997). A biopsychosocial approach to work-stress and musculoskeletal disorders. *Journal of Psychophysiology*, 11(3), 238–247.
- Merletti, R., Luca, C. J. de, & Sathyan, D. (1994). Electrically evoked myoelectric signals in back muscles: Effect of side dominance. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 77(5), 2104–2114. <https://doi.org/10.1152/jappl.1994.77.5.2104>
- Michalak, J., Troje, N. F., Fischer, J., Vollmar, P., Heidenreich, T., & Schulte, D. (2009). Embodiment of sadness and depression--gait patterns associated with dysphoric mood. *Psychosomatic Medicine*, 71(5), 580–587. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e3181a2515c>
- Mierswa, T., & Kellmann, M. (2015). The influences of recovery on low back pain development: A theoretical model. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 28(2), 253–262. <https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.00269>
- Mierswa, T., & Kellmann, M. (2017). Psychological detachment as moderator between psychosocial work conditions and low back pain development. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 30(2), 313–327. <https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.00861>
- Mitra, S., & Fraizer, E. V. (2004). Effects of explicit sway-minimization on postural-suprapostural dual-task performance. *Human Movement Science*, 23(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2004.03.003>

- Moore, L. J., Wilson, M. R., Vine, S. J., Coussens, A. H., & Freeman, P. (2013). Champ or chump? Challenge and threat states during pressurized competition. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 35(6), 551–562. <https://doi.org/10.1123/jsep.35.6.551>
- Moroney, B. W., Warm, J. S., & Dember, W. N. (1995). Effects of demand transitions on vigilance performance and perceived workload. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 39(21), 1375–1379. <https://doi.org/10.1177/154193129503902104>
- Nagai, Y., Critchley, H. D., Featherstone, E., Trimble, M. R., & Dolan, R. J. (2004). Activity in ventromedial prefrontal cortex covaries with sympathetic skin conductance level: A physiological account of a "default mode" of brain function. *NeuroImage*, 22(1), 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.01.019>
- Nair, S., Sagar, M., Sollers, J., Consedine, N., & Broadbent, E. (2015). Do slumped and upright postures affect stress responses? A randomized trial. *Health Psychology*, 34(6), 632–641. <https://doi.org/10.1037/hea0000146>
- National Institute for Occupational Safety and Health. (1992). *Selected Topics in Surface Electromyography for Use in the Occupational Setting: Expert Perspectives*. NIOSH Technical and Health Publication No. 91–100.
- National Research Council (US) and Institute of Medicine (US) Panel on Musculoskeletal Disorders and the Workplace (2001). *Musculoskeletal disorders and the workplace: low back and upper extremities*. National Academy Press. <https://doi.org/10.17226/10032>
- Naugle, K. M., Hass, C. J., Bowers, D., & Janelle, C. M. (2012). Emotional state affects gait initiation in individuals with Parkinson's disease. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 12(1), 207–219. <https://doi.org/10.3758/s13415-011-0071-9>
- Naugle, K. M., Hass, C. J., Joyner, J., Coombes, S. A., & Janelle, C. M. (2011). Emotional state affects the initiation of forward gait. *Emotion*, 11(2), 267–277. <https://doi.org/10.1037/a0022577>
- Newcomer, K. L., Jacobson, T. D., Gabriel, D. A., Larson, D. R., Brey, R. H., & An, K.-N. (2002). Muscle activation patterns in subjects with and without low back pain. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83(6), 816–821. <https://doi.org/10.1053/apmr.2002.32826>

- Niedenthal, P. M. (2007). Embodying emotion. *Science*, 316(5827), 1002–1005. <https://doi.org/10.1126/science.1136930>
- Nies, N., & Sinnott, P. L. (1991). Variations in balance and body sway in middle-aged adults. Subjects with healthy backs compared with subjects with low-back dysfunction. *Spine*, 16(3), 325–330. <https://doi.org/10.1097/00007632-199103000-00012>
- Nilsen, K. B., Sand, T., Stovner, L. J., Leistad, R. B., & Westgaard, R. H. (2007). Autonomic and muscular responses and recovery to one-hour laboratory mental stress in healthy subjects. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 8, Article 81. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-8-81>
- Nimbarte, A. D., Al Hassan, M. J., Guffey, S. E., & Myers, W. R. (2012). Influence of psychosocial stress and personality type on the biomechanical loading of neck and shoulder muscles. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(5), 397–405. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.05.001>
- Nordander, C., Willner, J., Hansson, G.-A., Larsson, B., Unge, J., Granquist, L., & Skerfving, S. (2003). Influence of the subcutaneous fat layer, as measured by ultrasound, skinfold calipers and BMI, on the EMG amplitude. *European Journal of Applied Physiology*, 89(6), 514–519. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0819-1>
- Noteboom, J. T., Barnholt, K. R., & Enoka, R. M. (2001). Activation of the arousal response and impairment of performance increase with anxiety and stressor intensity. *Journal of Applied Physiology*, 91(5), 2093–2101. <https://doi.org/10.1152/jappl.2001.91.5.2093>
- Noteboom, J. T., Fleshner, M., & Enoka, R. M. (2001). Activation of the arousal response can impair performance on a simple motor task. *Journal of Applied Physiology*, 91(2), 821–831. <https://doi.org/10.1152/jappl.2001.91.2.821>
- Nouwen, A., van Akkerveken, P. F., & Versloot, J. M. (1987). Patterns of muscular activity during movement in patients with chronic low-back pain. *Spine*, 12(8), 777–782. <https://doi.org/10.1097/00007632-198710000-00012>
- Noven, M. L., Pereira, H. M., Yoon, T., Stevens, A. A., Nielson, K. A., & Hunter, S. K. (2014). Motor variability during sustained contractions increases with cognitive demand in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6, Article 97. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2014.00097>

- Nutt, J. G., Marsden, C. D., & Thompson, P. D. (1993). Human walking and higher-level gait disorders, particularly in the elderly. *Neurology*, 43(2), 268–279. <https://doi.org/10.1212/wnl.43.2.268>
- Nygren, T. E. (1991). Psychometric properties of subjective workload measurement techniques: Implications for their use in the assessment of perceived mental workload. *Human Factors*, 33(1), 17–33. <https://doi.org/10.1177/001872089103300102>
- Oddsson, L. I. E., & Luca, C. J. de (2003). Activation imbalances in lumbar spine muscles in the presence of chronic low back pain. *Journal of Applied Physiology*, 94(4), 1410–1420. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01183.2001>
- O'Gorman, J. G., & Horneman, C. (1979). Consistency of individual differences in non-specific electrodermal activity. *Biological Psychology*, 9(1), 13–21. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(79\)90019-X](https://doi.org/10.1016/0301-0511(79)90019-X)
- Oken, D. (1968). Stimulus and response: The law of initial value. *Archives of General Psychiatry*, 19(6), 765–766. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.1968.01740120125022>
- O'Sullivan, P. (2005). Diagnosis and classification of chronic low back pain disorders: Maladaptive movement and motor control impairments as underlying mechanism. *Manual Therapy*, 10(4), 242–255. <https://doi.org/10.1016/j.math.2005.07.001>
- Otte, C., Hart, S [Stacey], Neylan, T. C., Marmar, C. R., Yaffe, K., & Mohr, D. C. (2005). A meta-analysis of cortisol response to challenge in human aging: Importance of gender. *Psychoneuroendocrinology*, 30(1), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2004.06.002>
- Pacak, K. (2000). Stressor-specific activation of the hypothalamic-pituitary-adrenocortical axis. *Physiological Research*, 49 Suppl 1, S11-S17.
- Pacak, K., Palkovits, M., Yadid, G., Kvetnansky, R., Kopin, I. J., & Goldstein, D. S. (1998). Heterogeneous neurochemical responses to different stressors: A test of Selye's doctrine of nonspecificity. *The American Journal of Physiology*, 275(4), R1247-R1255. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1998.275.4.R1247>
- Panjabi, M. M. (2006). A hypothesis of chronic back pain: Ligament subfailure injuries lead to muscle control dysfunction. *European Spine Journal*, 15(5), 668–676. <https://doi.org/10.1007/s00586-005-0925-3>

- Passatore, M., & Roatta, S. (2006). Influence of sympathetic nervous system on sensorimotor function: Whiplash associated disorders (WAD) as a model. *European Journal of Applied Physiology*, 98(5), 423–449. <https://doi.org/10.1007/s00421-006-0312-8>
- Patel, P., Lamar, M., & Bhatt, T. (2014). Effect of type of cognitive task and walking speed on cognitive-motor interference during dual-task walking. *Neuroscience*, 260, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2013.12.016>
- Peacock, B., Westers, T., Walsh, S., & Nicholson, K. (1981). Feedback and maximum voluntary contraction. *Ergonomics*, 24(3), 223–228. <https://doi.org/10.1080/00140138108559236>
- Pearson, D. G., Deeprose, C., Wallace-Hadrill, S. M. A., Burnett Heyes, S., & Holmes, E. A. (2013). Assessing mental imagery in clinical psychology: A review of imagery measures and a guiding framework. *Clinical Psychology Review*, 33(1), 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2012.09.001>
- Pellecchia, G. L. (2003). Postural sway increases with attentional demands of concurrent cognitive task. *Gait & Posture*, 18(1), 29–34. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(02\)00138-8](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(02)00138-8)
- Pereira, H. M., Spears, V. C., Schlinder-Delap, B., Yoon, T., Nielson, K. A., & Hunter, S. K. (2015). Age and sex differences in steadiness of elbow flexor muscles with imposed cognitive demand. *European Journal of Applied Physiology*, 115(6), 1367–1379. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3113-0>
- Peters, M. L., & Schmidt, A. J.M. (1991). Psychophysiological responses to repeated acute pain stimulation in chronic low back pain patients. *Journal of Psychosomatic Research*, 35(1), 59–74. [https://doi.org/10.1016/0022-3999\(91\)90007-B](https://doi.org/10.1016/0022-3999(91)90007-B)
- Pfeifer, K., Vogt, L., & Banzer, W. (2003). Kinesiologische Elektromyographie (EMG). *Deutsche Zeitschrift Für Sportmedizin*, 54(11), 331–332.
- Pfingsten, M., & Hildebrandt, J. (2004). Rückenschmerzen. In H.-D. Basler, C. Franz, B. Kröner-Herwig, & H.-P. Rehfisch (Eds.), *Psychologische Schmerztherapie* (5th ed., Vol. 23, pp. 395–414). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-09587-4_22
- Pincus, T., Burton, A. Kim, Vogel, S., & Field, A. P. (2002). A systematic review of psychological factors as predictors of chronicity/disability in prospective cohorts of low back pain. *Spine*, 27(5), E109–20. <https://doi.org/10.1097/00007632-200203010-00017>

- Pincus, T., Kent, P., Bronfort, G., Loisel, P., Pransky, G., & Hartvigsen, J. (2013). Twenty-five years with the biopsychosocial model of low back pain-is it time to celebrate? A report from the twelfth international forum for primary care research on low back pain. *Spine*, 38(24), 2118–2123. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3182a8c5d6>
- Plummer, P., & Eskes, G. (2015). Measuring treatment effects on dual-task performance: A framework for research and clinical practice. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, Article 225. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00225>
- Plummer, P., Eskes, G., Wallace, S., Giuffrida, C., Fraas, M., Campbell, G., Clifton, K., & Skidmore, E. R. (2013). Cognitive-motor interference during functional mobility after stroke: State of the science and implications for future research. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 94(12), 2565–2574.e6. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.08.002>
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2000). What is balance? *Clinical Rehabilitation*, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
- Prado, J. M., Stoffregen, T. A., & Duarte, M. (2007). Postural sway during dual tasks in young and elderly adults. *Gerontology*, 53(5), 274–281. <https://doi.org/10.1159/000102938>
- Price, J. P., Clare, M. H., & Ewerhardt, F. H. (1948). Studies in low backache with persistent muscle spasm. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 29(11), 703–709.
- Punnett, L., & Wegman, D. H. (2004). Work-related musculoskeletal disorders: The epidemiologic evidence and the debate. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 14(1), 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2003.09.015>
- Putzer, M., Ehrlich, I., Rasmussen, J., Gebbeken, N., & Dendorfer, S. (2016). Sensitivity of lumbar spine loading to anatomical parameters. *Journal of Biomechanics*, 49(6), 953–958. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.11.003>
- Quigley, K. S., Lindquist, K. A., & Barrett, L. F. (2014). Inducing and measuring emotion and affect: Tips, tricks, and secrets. In Reis, H. T. & Judd, C. M. (Eds.), *Handbook of research methods in social and personality psychology*, 2nd ed (pp. 220–252). Cambridge University Press.
- Radebold, A., Cholewicki, J., Panjabi, M. M., & Patel, T. C. (2000). Muscle response pattern to sudden trunk loading in healthy individuals and in patients with chronic low back pain. *Spine*, 25(8), 947–954. <https://doi.org/10.1097/00007632-200004150-00009>

- Radebold, A., Cholewicki, J., Polzhofer, G. K., & Greene, H. S. (2001). Impaired postural control of the lumbar spine is associated with delayed muscle response times in patients with chronic idiopathic low back pain. *Spine*, 26(7), 724–730. <https://doi.org/10.1097/00007632-200104010-00004>
- Radloff, L. S. (1977). The CES-D Scale. *Applied Psychological Measurement*, 1(3), 385–401. <https://doi.org/10.1177/014662167700100306>
- Rankin, J. K., Woollacott, M. H., Shumway-Cook, A., & Brown, L. A. (2000). Cognitive Influence on Postural Stability: A Neuromuscular Analysis in Young and Older Adults. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 55(3), M112-M119. <https://doi.org/10.1093/gerona/55.3.M112>
- Ransford, A., Cairns, D., & Mooney, V. (1976). The pain drawing as an aid to the psychologic evaluation of patients with low-back pain. *Spine*(1), 127–134.
- Raymakers, J. A., Samson, M. M., & Verhaar, H. J. J. (2005). The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s). *Gait & Posture*, 21(1), 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2003.11.006>
- Reeves, N. P., Cholewicki, J., & Silfies, S. P. (2006). Muscle activation imbalance and low-back injury in varsity athletes. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 16(3), 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2005.07.008>
- Reeves, N. P., Cholewicki, J., van Dieën, J. H., Kawchuk, G., & Hodges, P., W. (2019). Are stability and instability relevant concepts for back pain? *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 49(6), 415–424. <https://doi.org/10.2519/jospt.2019.8144>
- Reigo, T., Timpka, T., & Tropp, H. (1999). The epidemiology of back pain in vocational age groups. *Scandinavian Journal of Primary Health Care*, 17(1), 17–21. <https://doi.org/10.1080/028134399750002836>
- Reinhardt, T., Schmahl, C., Wüst, S., & Bohus, M. (2012). Salivary cortisol, heart rate, electrodermal activity and subjective stress responses to the Mannheim Multicomponent Stress Test (MMST). *Psychiatry Research*, 198(1), 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2011.12.009>

- Renkawitz, T., Boluki, D., & Grifka, J. (2006). The association of low back pain, neuromuscular imbalance, and trunk extension strength in athletes. *The Spine Journal*, 6(6), 673–683. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2006.03.012>
- Riley, M. A., Baker, A. A., & Schmit, J. M. (2003). Inverse relation between postural variability and difficulty of a concurrent short-term memory task. *Brain Research Bulletin*, 62(3), 191–195. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2003.09.012>
- Ringheim, I., Indahl, A., & Roeleveld, K. (2019). Reduced muscle activity variability in lumbar extensor muscles during sustained sitting in individuals with chronic low back pain. *PLoS One*, 14(3), Article e0213778. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213778>
- Rissen, D., Melin, B., Sandsjö, L., Dohns, I., & Lundberg, U. (2000). Surface EMG and psychophysiological stress reactions in women during repetitive work. *European Journal of Applied Physiology*, 83(2-3), 215–222. <https://doi.org/10.1007/s004210000281>
- Roatta, S., & Farina, D. (2010). Sympathetic actions on the skeletal muscle. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 38(1), 31–35. <https://doi.org/10.1097/JES.0b013e3181c5cde7>
- Roelofs, K., Hageraars, M. A., & Stins, J. (2010). Facing freeze: Social threat induces bodily freeze in humans. *Psychological Science*, 21(11), 1575–1581. <https://doi.org/10.1177/0956797610384746>
- Roland, M. O. (1986). A critical review of the evidence for a pain-spasm-pain cycle in spinal disorders. *Clinical Biomechanics*, 1(2), 102–109. [https://doi.org/10.1016/0268-0033\(86\)90085-9](https://doi.org/10.1016/0268-0033(86)90085-9)
- Roman-Liu, D., Grabarek, I., Bartuzi, P., & Choromański, W. (2013). The influence of mental load on muscle tension. *Ergonomics*, 56(7), 1125–1133. <https://doi.org/10.1080/00140139.2013.798429>
- Rubin, D. I. (2007). Epidemiology and risk factors for spine pain. *Neurologic Clinics*, 25(2), 353–371. <https://doi.org/10.1016/j.ncl.2007.01.004>
- Russell, J. A., Weiss, A., & Mendelsohn, G. A. (1989). Affect Grid: A single-item scale of pleasure and arousal. *Journal of Personality and Social Psychology*, 57(3), 493–502. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.57.3.493>

- Salavati, M., Mazaheri, M., Negahban, H., Ebrahimi, I., Jafari, A. H., Kazemnejad, A., & Parnianpour, M. (2009). Effect of dual-tasking on postural control in subjects with nonspecific low back pain. *Spine*, 34(13), 1415–1421. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181a3a917>
- Salkind, N. J. (2010). *Encyclopedia of research design*. Sage. <https://doi.org/10.4135/9781412961288>
- Sauter, S. L., & Swanson, N. G. (1996). An ecological model of musculoskeletal disorders in office work. In S. D. Moon & S. L. Sauter (Eds.), *Beyond biomechanics: Psychosocial aspects of musculoskeletal disorders in office work* (pp. 3–21). Taylor & Francis.
- Schaper, N. (2019). Wirkungen der Arbeit. In F. W. Nerdinger, G. Blickle, & N. Schaper (Eds.), *Springer-Lehrbuch. Arbeits- und Organisationspsychologie* (4th ed., Vol. 49, pp. 573–600). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56666-4_28
- Schleifer, L. M., Spalding, T. W., Kerick, S. E., Cram, J. R., Ley, R., & Hatfield, B. D. (2008). Mental stress and trapezius muscle activation under psychomotor challenge: A focus on EMG gaps during computer work. *Psychophysiology*, 45(3), 356–365. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00645.x>
- Scholle, H.-C., Anders, C., & Scholle, T. (2016). Anatomie, Physiologie und Pathophysiologie. In H.-R. Casser, M. Hasenbring, A. Becker, & R. Baron (Eds.), *Rückenschmerzen und Nackenschmerzen: Interdisziplinäre Diagnostik und Therapie, Versorgungspfade, Patientenedukation, Begutachtung, Langzeitbetreuung* (Vol. 89, pp. 13–26). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29775-5_2
- Scholz, U., Gutiérrez Doña, B., Sud, S., & Schwarzer, R. (2002). Is general self-efficacy a universal construct? *European Journal of Psychological Assessment*, 18(3), 242–251. <https://doi.org/10.1027//1015-5759.18.3.242>
- Schönfeld, P., Preusser, F., & Margraf, J. (2017). Costs and benefits of self-efficacy: Differences of the stress response and clinical implications. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 75, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.01.031>

- Schwarzer, R., Bäßler, J., Kwiatek, P., Schröder, K., & Zhang, J. X. (1997). The assessment of optimistic self-beliefs: Comparison of the German, Spanish, and Chinese versions of the General Self-efficacy Scale. *Applied Psychology*, 46(1), 69–88. <https://doi.org/10.1111/j.1464-0597.1997.tb01096.x>
- Schwarzer, R., & Jerusalem, M. (Eds.). (1999). *Skalen zur Erfassung von Lehrer- und Schülermerkmalen: Dokumentation der psychometrischen Verfahren im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Modellversuchs Selbstwirksame Schulen*. Freie Universität Berlin.
- Seidler, R. D., Bernard, J. A., Burutolu, T. B., Fling, B. W., Gordon, M. T., Gwin, J. T., Kwak, Y., & Lipps, D. B. (2010). Motor control and aging: Links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(5), 721–733. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.10.005>
- Selye, H. (1936). A syndrome produced by diverse nocuous agents. *Nature*, 138(3479), 32. <https://doi.org/10.1038/138032a0>
- Shahidi, B., Haight, A., & Maluf, K. (2013). Differential effects of mental concentration and acute psychosocial stress on cervical muscle activity and posture. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23(5), 1082–1089. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2013.05.009>
- Shanbehzadeh, S., Salavati, M., Talebian, S., Khademi-Kalantari, K., & Tavahomi, M. (2018). Attention demands of postural control in non-specific chronic low back pain subjects with low and high pain-related anxiety. *Experimental Brain Research*, 236(7), 1927–1938. <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5267-6>
- Sherafat, S., Salavati, M., Takamjani, I. E., Akhbari, B., Rad, S. M., Mazaheri, M., Negahben, H., & Lali, P. (2014). Effect of dual-tasking on dynamic postural control in individuals with and without nonspecific low back pain. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 37(3), 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2014.02.003>
- Sherman, E. M. S., Strauss, E., & Spellacy, F. (1997). Validity of the paced auditory serial addition test (pasat) in adults referred for neuropsychological assessment after head injury. *The Clinical Neuropsychologist*, 11(1), 34–45. <https://doi.org/10.1080/13854049708407027>
- Shumway-Cook, A., Woollacott, M., Kerns, K. A., & Baldwin, M. (1997). The effects of two types of cognitive tasks on postural stability in older adults with and without a history of falls. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 52(4), M232–40. <https://doi.org/10.1093/gerona/52a.4.m232>

- Sibley, K. M., Mochizuki, G., Lakhani, B., & McIlroy, W. E. (2014). Autonomic contributions in postural control: A review of the evidence. *Reviews in the Neurosciences*, 25(5), 687–697. <https://doi.org/10.1515/revneuro-2014-0011>
- Siegrist, J. (1996). Adverse health effects of high-effort/low-reward conditions. *Journal of Occupational Health Psychology*, 1(1), 27–41. <https://doi.org/10.1037/1076-8998.1.1.27>
- Sielski, R., Rief, W., & Glombiewski, J. A. (2017). Efficacy of biofeedback in chronic back pain: A meta-analysis. *International Journal of Behavioral Medicine*, 24(1), 25–41. <https://doi.org/10.1007/s12529-016-9511-1>
- Stins, J., & Beek, P. (2007). Effects of affective picture viewing on postural control. *BMC Neuroscience*, 8, Article 83. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-8-83>
- Stins, J., Roerdink, M., & Beek, P. (2011). To freeze or not to freeze? Affective and cognitive perturbations have markedly different effects on postural control. *Human Movement Science*, 30(2), 190–202. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.05.013>
- Stoffregen, T. A., Smart, L. J., Bardy, B. G., & Pagulayan, R. J. (1999). Postural stabilization of looking. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 54(6), 1641–1658. <https://doi.org/10.1093/geron/54.6.1641>
- Storheim, K., & Zwart, J.-A. (2014). Musculoskeletal disorders and the Global Burden of Disease study. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 73(6), 949–950. <https://doi.org/10.1136/annrheumdis-2014-205327>
- Sturnieks, D. L., Delbaere, K., Brodie, M. A., & Lord, S. R. (2016). The influence of age, anxiety and concern about falling on postural sway when standing at an elevated level. *Human Movement Science*, 49, 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.06.014>
- Stuss, D. T., Stethem, L. L., & Poirier, C. A. (1987). Comparison of three tests of attention and rapid information processing across six age groups. *Clinical Neuropsychologist*, 1(2), 139–152. <https://doi.org/10.1080/13854048708520046>
- Suess, F. (2019). *The Influence of cognitive stress on muscle activation and spinal disc load: Ergonomics/occupational biomechanics/rehabilitation*. European Society of Biomechanics, Wien. <https://owncloud.tuwien.ac.at/index.php/s/dovqqcj02VeZHze>

- Swain, C. T. V., Pan, F., Owen, P. J., Schmidt, H., & Belavy, D. L. (2020). No consensus on causality of spine postures or physical exposure and low back pain: A systematic review of systematic reviews. *Journal of Biomechanics*, 102, Article 109312. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.08.006>
- Swan, L., Otani, H., & Loubert, P. V. (2007). Reducing postural sway by manipulating the difficulty levels of a cognitive task and a balance task. *Gait & Posture*, 26(3), 470–474. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.11.201>
- Swedish Council on Health Technology Assessment (SBU). (2014). *Occupational Exposures and Back Disorders*. Swedish Council on Health Technology Assessment (SBU).
- Tang, J., & Gibson, S. J. (2005). A psychophysical evaluation of the relationship between trait anxiety, pain perception, and induced state anxiety. *The Journal of Pain*, 6(9), 612–619. <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2005.03.009>
- Tanosoto, T., Bendixen, K. H., Arima, T., Hansen, J., Terkelsen, A. J., & Svensson, P. (2015). Effects of the Paced Auditory Serial Addition Task (PASAT) with different rates on autonomic nervous system responses and self-reported levels of stress. *Journal of Oral Rehabilitation*, 42(5), 378–385. <https://doi.org/10.1111/joor.12257>
- Teicher, M. H., Andersen, S. L., Polcari, A., Anderson, C. M., Navalta, C. P., & Kim, D. M. (2003). The neurobiological consequences of early stress and childhood maltreatment. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 27(1-2), 33–44. [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(03\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(03)00007-1)
- Tombaugh, T. N. (2006). A comprehensive review of the Paced Auditory Serial Addition Test (PASAT). *Archives of Clinical Neuropsychology*, 21(1), 53–76. <https://doi.org/10.1016/j.acn.2005.07.006>
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 29(1), 3–18. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.29.1.3>
- Tong, M. H., Mousavi, S. J., Kiers, H., Ferreira, P., Refshauge, K., & van Dieën, J. H. (2017). Is there a relationship between lumbar proprioception and low back pain? A systematic review with meta-analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 98(1), 120–136. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2016.05.016>

- Travell, J., Rinzler, S., & Herman, M. (1942). Pain and disability of the shoulder and arm. *Journal of the American Medical Association*, 120(6), 417–422. <https://doi.org/10.1001/jama.1942.02830410005002>
- Trepel, M., & Dalkowski, K. (2017). *Neuroanatomie: Struktur und Funktion* (7th ed.). Urban & Fischer Verlag GmbH & Co. KG.
- Triano, J. J., & Luttges, M. (1985). Myoelectric paraspinal response to spinal loads: Potential for monitoring low back pain. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 8(3), 137–145.
- Triano, J. J., & Schultz, A. B. (1987). Correlation of objective measure of trunk motion and muscle function with low-back disability ratings. *Spine*, 12(6), 561–565. <https://doi.org/10.1097/00007632-198707000-00010>
- Tsao, H., Galea, M. P., & Hodges, P., W. (2008). Reorganization of the motor cortex is associated with postural control deficits in recurrent low back pain. *Brain : A Journal of Neurology*, 131(Pt 8), 2161–2171. <https://doi.org/10.1093/brain/awn154>
- Turk, D. C. (1999). The role of psychological factors in chronic pain. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, 43(9), 885–888. <https://doi.org/10.1034/j.1399-6576.1999.430904.x>
- Turk, D. C., & Flor, H. (1984). Etiological theories and treatments for chronic back pain: II. Psychological models and interventions. *Pain*, 19(3), 209–233. [https://doi.org/10.1016/0304-3959\(84\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0304-3959(84)90001-0)
- Turk, D. C., & Okifuji, A. (2002). Psychological factors in chronic pain: Evolution and revolution. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 70(3), 678–690. <https://doi.org/10.1037//0022-006X.70.3.678>
- van Daele, U., Hagman, F., Truijen, S., Vorlat, P., van Gheluwe, B., & Vaes, P. (2009). Differences in balance strategies between nonspecific chronic low back pain patients and healthy control subjects during unstable sitting. *Spine*, 34(11), 1233–1238. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e31819ca3ee>
- van Daele, U., Hagman, F., Truijen, S., Vorlat, P., van Gheluwe, B., & Vaes, P. (2010). Decrease in postural sway and trunk stiffness during cognitive dual-task in nonspecific chronic low back pain patients, performance compared to healthy control subjects. *Spine*, 35(5), 583–589. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181b4fe4d>

- van Dieën, J. H., Cholewicki, J., & Radebold, A. (2003). Trunk muscle recruitment patterns in patients with low back pain enhance the stability of the lumbar spine. *Spine*, 28(8), 834–841. <https://doi.org/10.1097/01.BRS.0000058939.51147.55>
- van Dieën, J. H., Flor, H., & Hodges, P., W. (2017). Low-back pain patients learn to adapt motor behavior with adverse secondary consequences. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 45(4), 223–229. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000121>
- van Dieën, J. H., & Kingma, I. (2013). Spine function and low back pain. In P., W. Hodges, J. Cholewicki, & J. H. van Dieën (Eds.), *Spinal control: The rehabilitation of back pain: state of the art and science* (pp. 41–57). Churchill Livingstone/Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7020-4356-7.00005-7>
- van Dieën, J. H., Koppes, L. L. J., & Twisk, J. W. R. (2010). Low back pain history and postural sway in unstable sitting. *Spine*, 35(7), 812–817. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181bb81a8>
- van Dieën, J. H., Oude Vrielink, H. H., & Toussaint, H. M. (1993). An investigation into the relevance of the pattern of temporal activation with respect to erector spinae muscle endurance. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 66(1), 70–75. <https://doi.org/10.1007/BF00863403>
- van Dieën, J. H., Reeves, N. P., Kawchuk, G., van Dillen, L. R., & Hodges, P., W. (2019). Motor control changes in low back pain: Divergence in presentations and mechanisms. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 49(6), 370–379. <https://doi.org/10.2519/jospt.2019.7917>
- van Dieën, J. H., Selen, L. P. J., & Cholewicki, J. (2003). Trunk muscle activation in low-back pain patients, an analysis of the literature. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 13(4), 333–351. [https://doi.org/10.1016/s1050-6411\(03\)00041-5](https://doi.org/10.1016/s1050-6411(03)00041-5)
- van Dieën, J. H., Westebring-van der Putten, E. P., Kingma, I., & Looze, M. P. de (2009). Low-level activity of the trunk extensor muscles causes electromyographic manifestations of fatigue in absence of decreased oxygenation. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(3), 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2007.11.010>
- van Galen, G. P., & Jong, W. P. de (1995). Fitts' law as the outcome of a dynamic noise filtering model of motor control. *Human Movement Science*, 14(4-5), 539–571. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(95\)00027-3](https://doi.org/10.1016/0167-9457(95)00027-3)

- van Galen, G. P., Müller, M. L. T. M., Meulenbroek, R. G. J., & van Gemmert, A. W. A. (2002). Forearm EMG response activity during motor performance in individuals prone to increased stress reactivity. *American Journal of Industrial Medicine*, 41(5), 406–419. <https://doi.org/10.1002/ajim.10051>
- van Galen, G. P., & Schomaker, L. R. (1992). Fitts' law as a low-pass filter effect of muscle stiffness. *Human Movement Science*, 11(1-2), 11–21. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(92\)90046-E](https://doi.org/10.1016/0167-9457(92)90046-E)
- van Galen, G. P., van Doorn, R. R., & Schomaker, L. R. (1990). Effects of motor programming on the power spectral density function of finger and wrist movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(4), 755–765. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.16.4.755>
- van Galen, G. P., & van Huygevoort, M. (2000). Error, stress and the role of neuromotor noise in space oriented behaviour. *Biological Psychology*, 51(2-3), 151–171. [https://doi.org/10.1016/s0301-0511\(99\)00037-x](https://doi.org/10.1016/s0301-0511(99)00037-x)
- van Gemmert, A. W. A., & van Galen, G. P. (1997). Stress, neuromotor noise, and human performance: A theoretical perspective. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(5), 1299–1313. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.23.5.1299>
- van Loon, E. M., Masters, R. S., Ring, C., & McIntyre, D. B. (2001). Changes in limb stiffness under conditions of mental stress. *Journal of Motor Behavior*, 33(2), 153–164. <https://doi.org/10.1080/00222890109603147>
- van Tulder, M., Koes, B. W., & Bombardier, C. (2002). Low back pain. *Best Practice & Research. Clinical Rheumatology*, 16(5), 761–775. <https://doi.org/10.1053/berh.2002.0267>
- Veiersted, K. B., Westgaard, R. H., & Andersen, P. (1993). Electromyographic evaluation of muscular work pattern as a predictor of trapezius myalgia. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 19(4), 284–290. <https://doi.org/10.5271/sjweh.1472>
- Vera-Garcia, F. J., Brown, S. H. M., Gray, J. R., & McGill, S. M. (2006). Effects of different levels of torso coactivation on trunk muscular and kinematic responses to posteriorly applied sudden loads. *Clinical Biomechanics*, 21(5), 443–455. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.12.006>

- Videman, T., Rauhala, H., Asp, S., Lindström, K., Cedercreutz, G., Kämppi, M., Tola, S., & Troup, J. D. (1989). Patient-handling skill, back injuries, and back pain. An intervention study in nursing. *Spine*, 14(2), 148–156. <https://doi.org/10.1097/00007632-198902000-00002>
- Visser, B., Looze, M. de, Graaff, M. de, & van Dieën, J. H. (2004). Effects of precision demands and mental pressure on muscle activation and hand forces in computer mouse tasks. *Ergonomics*, 47(2), 202–217. <https://doi.org/10.1080/00140130310001617967>
- von Zerssen, D. (1976). *Die Befindlichkeits-Skala - Parallelförmige Bf-S und BF-S'. Manual*. Beltz.
- Vuillerme, N., & Nafati, G. (2007). How attentional focus on body sway affects postural control during quiet standing. *Psychological Research*, 71(2), 192–200. <https://doi.org/10.1007/s00426-005-0018-2>
- Waddell, G. (1987). 1987 Volvo award in clinical sciences. A new clinical model for the treatment of low-back pain. *Spine*, 12(7), 632–644. <https://doi.org/10.1097/00007632-198709000-00002>
- Waersted, M., Bjørklund, R. A., & Westgaard, R. H. (1991). Shoulder muscle tension induced by two VDU-based tasks of different complexity. *Ergonomics*, 34(2), 137–150. <https://doi.org/10.1080/00140139108967302>
- Waersted, M., & Westgaard, R. H. (1996). Attention-related muscle activity in different body regions during VDU work with minimal physical activity. *Ergonomics*, 39(4), 661–676. <https://doi.org/10.1080/00140139608964488>
- Wahlström, J. (2005). Ergonomics, musculoskeletal disorders and computer work. *Occupational Medicine*, 55(3), 168–176. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqi083>
- Wahlström, J., Hagberg, M., Johnson, P. W., Svensson, J., & Rempel, D. (2002). Influence of time pressure and verbal provocation on physiological and psychological reactions during work with a computer mouse. *European Journal of Applied Physiology*, 87(3), 257–263. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0611-7>
- Wahlström, J., Lindegård, A., Ahlborg, G., Ekman, A., & Hagberg, M. (2003). Perceived muscular tension, emotional stress, psychological demands and physical load during VDU work. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 76(8), 584–590. <https://doi.org/10.1007/s00420-003-0454-5>

- Wahlström, J., Svensson, J., Hagberg, M., & Johnson, P. W. (2000). Differences between work methods and gender in computer mouse use. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 26(5), 390–397. <https://doi.org/10.5271/sjweh.559>
- Waldstein, S. R., Kop, W. J., Schmidt, L. A., Haufler, A. J., Krantz, D. S., & Fox, N. A. (2000). Frontal electrocortical and cardiovascular reactivity during happiness and anger. *Biological Psychology*, 55(1), 3–23. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(00\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(00)00065-X)
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236–244. <https://doi.org/10.2307/2282967>
- Weil, J. L. (1974). *A neurophysiological model of emotional and intentional behavior*. Charles C Thomas.
- Weiner, H. (1992). *The John D. And Catherine T. Macarthur Foundation series on mental health. Perturbing the organism: The biology of stressful experience*. University of Chicago Press.
- Westermann, R., Spies, K., Stahl, G., & Hesse, F. W. (1996). Relative effectiveness and validity of mood induction procedures: a meta-analysis. *European Journal of Social Psychology*, 26(4), 557–580. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0992\(199607\)26:4<557::AID-EJSP769>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0992(199607)26:4<557::AID-EJSP769>3.0.CO;2-4)
- Westgaard, R. H. (1999). Effects of physical and mental stressors on muscle pain. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 25 Suppl 4, 19–24.
- Wheaton, B. (1985). Models for the stress-buffering functions of coping resources. *Journal of Health and Social Behavior*, 26(4), 352–364. <https://doi.org/10.2307/2136658>
- Wijsman, J. (2014). *Sensing stress: Stress detection from physiological variables in controlled and uncontrolled conditions*. University of Twente. <https://research.utwente.nl/en/publications/sensing-stress-stress-detection-from-physiological-variables-in-c>
<https://doi.org/10.3990/1.9789036537585>
- Wijsman, J., Grundlehner, B., Penders, J., & Hermens, H. (2013). Trapezius muscle EMG as predictor of mental stress. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 12(4), 1–20. <https://doi.org/10.1145/2485984.2485987>

- Williams, A. C. d. C., Eccleston, C., & Morley, S. (2012). Psychological therapies for the management of chronic pain (excluding headache) in adults. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 11, CD007407. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD007407.pub3>
- Willigenburg, N. W., Kingma, I., & van Dieën, J. H. (2013). Center of pressure trajectories, trunk kinematics and trunk muscle activation during unstable sitting in low back pain patients. *Gait & Posture*, 38(4), 625–630. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.02.010>
- Willmann, M., Langlet, C., Hainaut, J.-P., & Bolmont, B. (2012). The time course of autonomic parameters and muscle tension during recovery following a moderate cognitive stressor: Dependency on trait anxiety level. *International Journal of Psychophysiology*, 84(1), 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.01.009>
- Wilson, B. L., Albright, G. L., Steiner, S. S., & Andreassi, J. L. (1991). Cardiodynamic response to psychological and cold pressor stress: Further evidence for stimulus response specificity and directional fractionation. *Biofeedback and Self-Regulation*, 16(1), 45–53. <https://doi.org/10.1007/BF01000445>
- Winter, J. C. F. de (2014). Controversy in human factors constructs and the explosive use of the NASA-TLX: a measurement perspective. *Cognition, Technology & Work*, 16(3), 289–297. <https://doi.org/10.1007/s10111-014-0275-1>
- Witte, K. (2018). *Ausgewählte Themen der Sportmotorik für das weiterführende Studium (Band 2)*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57876-6>
- Wixted, F., & O’ Sullivan, L. (2018). Effect of attention demand on upper trapezius muscle activity – A moderated mediation model. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 66, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.03.001>
- Wolf, A. D., & Pfleger, B. (2003). Burden of major musculoskeletal conditions. *Bulletin of the World Health Organization*, 81(9), 646–656. <https://doi.org/10.1590/S0042-96862003000900007>
- Woollacott, M., & Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait & Posture*, 16(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(01\)00156-4](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(01)00156-4)

- Yang, H., Haldeman, S., Lu, M.-L., & Baker, D. (2016). Low back pain prevalence and related workplace psychosocial risk factors: A study using data from the 2010 National Health Interview Survey. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 39(7), 459–472. <https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2016.07.004>
- Yogev-Seligmann, G., Hausdorff, J. M., & Giladi, N. (2008). The role of executive function and attention in gait. *Movement Disorders*, 23(3), 329–342. <https://doi.org/10.1002/mds.21720>
- Zaback, M., Cleworth, T. W., Carpenter, M. G., & Adkin, A. L. (2015). Personality traits and individual differences predict threat-induced changes in postural control. *Human Movement Science*, 40, 393–409. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.01.015>
- Zänkert, S., Bellingrath, S., Wüst, S., & Kudielka, B. M. (2019). HPA axis responses to psychological challenge linking stress and disease: What do we know on sources of intra- and interindividual variability? *Psychoneuroendocrinology*, 105, 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2018.10.027>
- Zilles, K., & Tillmann, B. N. (2010). *Anatomie*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69483-0>
- Zupan, B., & Babbage, D. R. (2017). Film clips and narrative text as subjective emotion elicitation techniques. *The Journal of Social Psychology*, 157(2), 194–210. <https://doi.org/10.1080/00224545.2016.1208138>